

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROTEÇÃO PASSIVA DE ESTRUTURAS E SISTEMAS ELÉTRICOS CONTRA  
INCÊNDIO APLICADA A UMA UNIDADE DE REFINO DE PETRÓLEO.

por

Cíntia Silveira

Dissertação para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, abril de 2005.

PROTEÇÃO PASSIVA DE ESTRUTURAS E SISTEMAS ELÉTRICOS CONTRA  
INCÊNDIO APLICADA A UMA UNIDADE DE REFINO DE PETRÓLEO.

por

Cíntia Silveira  
Engenheira Química

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. César Antônio Leal

Aprovada por:

Prof. Marco Túlio Menna Barreto de Vilhena

Prof. Paulo Smith Schneider

Prof. Rubem da Cunha Reis

Prof. Flávio José Lorini  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 18 de abril de 2005.

## RESUMO

Nesta dissertação visa-se estudar e propor alternativas de solução para a proteção de estruturas e sistemas elétricos contra fogo numa unidade de craqueamento catalítico de uma refinaria de petróleo, por meio de proteção passiva. A proteção passiva tem por finalidade garantir a integridade das estruturas sujeitas a incêndio, durante um determinado período de tempo, para possibilitar, no caso da refinaria, a realização de procedimentos de parada da unidade de forma segura e controlar o incêndio a fim de diminuir a possibilidade de propagação do fogo para outras áreas.

Com base em técnicas de análise de riscos fez-se a identificação de zonas potencialmente sujeitas a cenários de acidente envolvendo jato de fogo e/ou incêndio em poça. A delimitação das áreas onde haveria necessidade de proteção passiva foi realizada com base em modelos para jatos de fogo e incêndio em poça já estabelecidos na literatura. O dimensionamento da proteção passiva de estruturas e sistemas elétricos com o uso de diversos materiais usados comercialmente para este fim foi estimado com base em equações empíricas desenvolvidas por Jeanes, 1980, Stanzak, 1973 e PABCO, 1984, e, para alguns casos particulares foi feita uma verificação por solução numérica da equação da condução do calor em meio sólido.

Assim, foram determinados quais os materiais mais adequados em cada caso de aplicação e qual a espessura em que deve ser aplicado para que a temperatura no elemento estrutural ou no sistema elétrico não atinja a sua determinada temperatura crítica em um período de tempo pré-determinado. Para os casos de elementos estruturais como colunas de sustentação da unidade de seção cilíndrica, o principal material para proteção passiva é a argamassa projetada e para perfil I, é o emprego de placas de gesso. Já para o caso de sistemas elétricos, podem ser utilizadas tanto tintas intumescentes quanto as mantas reforçadas com fibras minerais, esta escolha depende da geometria do sistema em que será empregado.

Da comparação entre estes dois métodos pode-se concluir que o dimensionamento da proteção passiva fazendo o uso das correlações empíricas é menos conservativo que para o caso do uso da equação da difusão do calor resolvida por método numérico. Porém, os resultados diferem dentro de um limite considerado aceitável (em torno de 15%) levando-se em consideração os erros embutidos em cada método de cálculo. É importante mencionar que as correlações empíricas são de mais simples aplicação por possuir apenas operações matemáticas básicas.

Usando as correlações empíricas para os perfis cilíndricos de aço (diâmetro de 0,1524 m e espessura de parede de 0,0254 m), a espessura de revestimento estimada com o uso das correlações empíricas necessária para garantir que a temperatura na interface entre os dois

materiais não atinja 550°C em duas horas seria de 13,5 mm para argamassa projetada, 19,7 mm para vermiculita com silicato de sódio e 34,5 mm para revestimento com concreto com proteção do tipo contorno. Fazendo o mesmo cálculo pelo método numérico proposto, os resultados foram de 15,53 mm para argamassa projetada, 22,06 mm para vermiculita com silicato de sódio e 38,98 mm para revestimento com concreto com proteção do tipo contorno.

Cabe ressaltar que com a realização desta dissertação busca-se uma integração entre o mestrado acadêmico e o meio empresarial com o desenvolvimento de trabalhos de natureza acadêmica que tenham aplicação direta na prática. Espera-se assim permitir que Universidade dê retorno à sociedade que a mantém e propiciar que setores da sociedade possam usufruir da capacidade disponível na academia.

## **ABSTRACT**

“Passive Protection against Fire for Structures and Electrical Systems in a Petroleum Refining Unit”

In this dissertation, we study and present alternative solutions for passive protection of structures and electrical systems against fire, in a catalytic cracking unit of a petroleum refinery. The aim of passive protection is to guarantee the integrity of structures subject to fire, during a given period of time, enabling, in case of a refinery, the necessary procedures to be taken to shut down the unit in a safe way and to control the fire, in order to minimize the possibility of fire propagation to other areas.

Risk analysis techniques were used to identify areas potentially subject to damage in case of accidents involving heat radiation (flame jet and/or pool fire) in this study. The delimitation of areas where there would be need for passive protection was done using on models for flame jets and pool fire usually found in the literature. For jet fire, the models used were Clay, 1987, Cook, Bahrami and Whitehouse, 1990, and Chamberlain, 1987; and for pool fire the models of Hottel, 1959, Mudan and Croce, 1988 and Thomas, 1963. The dimensioning of passive protection for structures and electric systems using several materials employed commercially for this purpose was estimated using empiric equations developed by Jeanes, 1980, Stanzak, 1973 and Pabco, 1984.

For several cases, it was determined the most appropriate materials to be used and the necessary protective layer thickness to be applied in order to guarantee that the temperature of the structural element or at the electric system would not reach a critical temperature, in a pre-established period of time. For structural elements such as support columns for the cylindrical profiles, the main material for passive protection used is projected mortar and for the profiles in I is wall plaster. However, in cases of electrical systems, intumescent paints can be used as well as insulation blankets reinforced with mineral fibers, the selection depends on the geometry of the system that will be employed.

Comparing the results obtained with these two methods, it is possible to conclude that the use of the empiric equation is slightly less conservative than the use of the equation of the diffusion of the heat solved by numeric method. However, the results differ within limits considered acceptable (around 15%) taking into consideration the inherent errors of each calculation method. Needless to say that empiric equation requires only basic mathematical operations.

Using the empiric equation for the cylindrical profiles of steel (diameter of 0,1524 m and wall thickness of 0,0254 m), the necessary coating to guarantee that the temperature in the interface among the two materials doesn't reach 550°C in two hours it is 13,5 mm for projected mortar, 19,7 mm for vermiculita with silicato of sodium and 34,5 mm for encasing with concrete protection contour type. The same calculation by numeric method resulted in 15,53 mm for projected mortar, 22,06 mm for vermiculita with silicato of sodium and 38,98 mm for encasing with concrete protection contour type.

The study was done with a spirit of integration between the academic master program and the industrial sector with the selection of a topic of study with practical and immediate application. So, it allows the University to be useful to society, which is responsible for its maintenance, and to permit that sectors of society make use of the available human resources of the academy.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVOS .....	4
1.3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	5
2	UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO - FCC.....	7
2.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO .....	8
2.2	PRODUTOS DO CRAQUEAMENTO CATALÍTICO .....	11
2.3	RESUMO .....	12
3	IDENTIFICAÇÃO E ESCOLHA DOS CENÁRIOS ANALISADOS .....	13
3.1	CENÁRIOS ANALISADOS .....	13
3.1.1	<i>Cenário de acidente 01: Vazamento de gases de craqueamento por ruptura da junta do flange, na saída do 2º estágio do compressor de gases .....</i>	<i>14</i>
3.1.2	<i>Cenário de acidente 02: Vazamento de gás combustível na entrada da torre absorvedora primária.....</i>	<i>15</i>
3.1.3	<i>Cenário de acidente 03: Vazamento de GLP na saída da debutanizadora.....</i>	<i>16</i>
3.1.4	<i>Cenário de acidente 04: Vazamento de nafta de craqueamento (gasolina) pela bomba de refluxo da absorvedora primária .....</i>	<i>17</i>
3.1.5	<i>Cenário de acidente 05: Vazamento de gás combustível devido a falha em juntas e/ou flanges no tratamento com DEA .....</i>	<i>18</i>
3.1.6	<i>Cenário de acidente 06: Vazamento de GLP devido a falha em juntas e/ou flanges no tratamento com Merox/DEA.....</i>	<i>18</i>
3.2	RESUMO .....	19
4	DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE JATO DE FOGO E INCÊNDIO EM POÇA.....	20
4.1	JATO DE FOGO OU TOCHA .....	20
4.1.1	<i>Modelos de cálculo de jato de fogo .....</i>	<i>22</i>
4.1.1.1	<i>Descarga de gás.....</i>	<i>22</i>
4.1.1.2	<i>Modelo de Clay et alli.....</i>	<i>24</i>
4.1.1.3	<i>Modelo de Cook, Bahrami e Whitehouse .....</i>	<i>24</i>
4.1.1.4	<i>Modelo de Chamberlain.....</i>	<i>24</i>
4.1.2	<i>Resultados dos cenários de acidentes do tipo jato de fogo.....</i>	<i>26</i>
4.2	INCÊNDIO EM POÇA .....	33

4.2.1	<i>Modelos de cálculo de incêndio em poça</i> .....	34
4.2.1.1	Descarga de líquido.....	34
4.2.1.2	Taxa mássica de queima por unidade de área.....	36
4.2.1.3	Diâmetro máximo da poça .....	37
4.2.1.4	Altura da chama .....	39
4.2.1.5	Inclinação da chama.....	39
4.2.2	<i>Resultados do cenário de acidente do tipo incêndio em poça</i> .....	40
4.3	RESUMO.....	43
5	EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE ESTRUTURAS E SISTEMAS ELÉTRICOS	44
5.1	MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AÇO .....	44
5.2	EFEITOS ESTRUTURAIS .....	45
5.3	EFEITOS SOBRE OS SISTEMAS ELÉTRICOS.....	46
5.4	RESUMO.....	46
6	MÉTODOS DE PROTEÇÃO PASSIVA .....	47
6.1	BARREIRAS DE PROTEÇÃO.....	47
6.2	RECOBRIMENTO COM MATERIAIS RESISTENTES A FOGO ( <i>FIREPROOFING</i> ) .....	48
6.2.1	<i>Sistemas de revestimento aplicados em camadas ou em forma de spray</i> .....	48
6.2.2	<i>Sistemas de revestimento por encapsamento</i> .....	49
6.2.3	<i>Sistemas de caixas de proteção</i> .....	50
6.3	ISOLAMENTO TÉRMICO.....	53
6.4	DISTÂNCIAS SEGURAS .....	53
6.5	SISTEMA DE CONTROLE E DRENAGEM DE DERRAMAMENTOS.....	54
6.6	RESUMO.....	54
7	ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE ESTRUTURAS E SISTEMAS ELÉTRICOS EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO .....	55
7.1	INTRODUÇÃO .....	55
7.2	TESTE PADRÃO PARA A AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ESTRUTURAS DE AÇO FRENTE AO FOGO	57
7.3	RESISTÊNCIA AO FOGO DE ELEMENTOS DE AÇO .....	59
7.3.1	<i>Correlações empíricas</i> .....	59
7.3.2	<i>Análise de transferência de calor</i> .....	64
7.3.2.1	Métodos numéricos .....	64
7.3.2.1.1	Elementos estruturais não protegidos termicamente.....	66

7.3.2.1.2	Elementos estruturais protegidos termicamente .....	69
7.3.2.2	Soluções gráficas.....	69
7.3.2.3	Códigos computacionais .....	70
7.3.3	<i>Análise estrutural</i> .....	70
7.4	RESUMO.....	71
8	PROTEÇÃO PASSIVA CONTRA FOGO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS E SISTEMAS ELÉTRICOS.....	72
8.1	ANÁLISE SEM PROTEÇÃO PASSIVA CONTRA INCÊNDIO.....	73
8.2	ANÁLISE COM PROTEÇÃO PASSIVA CONTRA INCÊNDIO .....	75
8.3	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS DE PROTEÇÃO PASSIVA.....	78
8.4	RESUMO .....	91
9	CONCLUSÕES .....	92
10	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	95

## LISTA DE SÍMBOLOS

- A - área da seção transversal do orifício [ $m^2$ ]  
 $A_s$  - área da seção transversal da coluna [polegadas<sup>2</sup>]  
 $A_{sup}$  - a área superficial do sólido [ $m^2$ ]  
 $b_f$  - largura da viga [polegadas]  
C – constante da equação de temperatura de chama [adimensional]  
 $C_1$  e  $C_2$  - constantes específicas de cada material de proteção  
 $c_c$  - calor específico do concreto na temperatura ambiente [ $Btu.lb^{-1}.°F^{-1}$ ]  
 $c_i$  - calor específico do material de isolamento [ $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ]  
 $C_d$  - coeficiente de descarga [adimensional], geralmente varia entre 0,9 e 1,0  
 $C_p$  - capacidade calorífica do líquido a pressão constante [ $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ]  
 $c_{ps}$  - capacidade calorífica do sólido a pressão constante [ $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ]  
 $c_s$  - capacidade calorífica do aço [ $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ]  
d - diâmetro do orifício por onde ocorre a liberação [m]  
 $d_v$  - profundidade da viga [polegadas]  
D - perímetro de aquecimento [polegadas]  
 $D_{pc}$  - diâmetro equivalente de poça de material inflamável circular [m]  
 $D_s$  - diâmetro efetivo da fonte [m]  
 $d_j$  - diâmetro virtual da fonte [m]  
g - aceleração da gravidade [ $m.s^{-2}$ ]  
H - altura da chama [m]  
 $H_s$  - capacidade térmica do aço na temperatura ambiente [ $Btu.ft^{-1}.°F^{-1}$ ]  
h - espessura do isolamento em m [polegadas]  
 $h_c$  - coeficiente de transferência de calor por convecção [ $W.m^{-2}.K^{-1}$ ]  
 $h_i$  - espessura do isolamento [m]  
 $h_l$  - altura de líquido no reservatório [m]  
 $h_{l0}$  - altura inicial de líquido no reservatório [m]  
 $h_0$  - altura do orifício [m]  
k - condutividade térmica do sólido [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ]  
 $k_c$  - condutividade térmica do concreto na temperatura ambiente [ $Btu.h^{-1}.ft^{-1}.°F^{-1}$ ]  
 $k_i$  - condutividade térmica do material de isolamento [ $W.m^{-1}.°C^{-1}$ ]  
L - comprimento do jato de fogo [m]  
 $L_c$  - uma das dimensões da caixa de proteção do concreto [polegadas]  
 $L_o$  - comprimento do jato de fogo na direção vertical [m]

$L_p$  - espessura da parede [m]  
 $m$  - umidade contida no concreto [% de volume]  
 $M$  - número de subdivisões na variável espacial  
 $Ma$  - número de Mach [adimensional]  
 $m_b$  - taxa de queima por unidade de área de poça [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]  
 $m_g$  - taxa mássica de descarga do gás [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]  
 $M_g$  - massa molecular do gás [ $\text{kg}\cdot\text{kgmol}^{-1}$ ]  
 $m_l$  - taxa mássica de descarga do líquido [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]  
 $n$  - subdivisões na variável temporal [adimensional]  
 $P_1$  - pressão a jusante do orifício [Pa], comumente é a pressão do reservatório  
 $P_2$  - pressão na saída do orifício [Pa], comumente é a pressão atmosférica  
 $P_a$  - pressão atmosférica [Pa]  
 $P_r$  - pressão a montante da liberação [Pa], comumente é a pressão do reservatório  
 $\dot{Q}$  - taxa na qual a energia é gerada por unidade de volume do meio [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ]  
 $q''_{\text{sup}}$  - fluxo de calor total na superfície do cilindro [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $q''_c$  - fluxo de calor por convecção na superfície do cilindro [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $q''_r$  - fluxo de calor por radiação na superfície do cilindro [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $r$  - relação entre a difusividade térmica do material, o intervalo de tempo e a espessura na divisão da variável espacial  
 $R_{\text{ext}}$  - raio externo do cilindro [m]  
 $R_{\text{int}}$  - raio interno do cilindro [m]  
 $R_g$  - constante universal dos gases [ $\text{J}\cdot\text{kgmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]  
 $r_{\text{crit}}$  - relação crítica de pressões [adimensional]  
 $T$  - temperatura do sólido [K]  
 $T_a$  - temperatura ambiente [K]  
 $T_{\text{BP}}$  - temperatura de ebulição [K]  
 $T_f$  - temperatura da chama [K]  
 $T_i$  - temperatura inicial do sólido [K]  
 $T_r$  - temperatura do reservatório [K]  
 $TR$  - tempo de resistência ao fogo [min]  
 $TR_0$  - tempo de resistência ao fogo considerando o concreto isento de umidade [min]  
 $T_s$  - temperatura do aço [K]  
 $T_\infty$  - temperatura dos gases aquecidos [K]  
 $u_j$  - velocidade do gás na saída do bocal [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$u_v$  - velocidade do vento medida na cota de 10 m [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$V$  - volume do sólido [ $\text{m}^3$ ]

$v_r$  - velocidade do líquido no reservatório [ $\text{m.s}^{-1}$ ], comumente considera-se esta velocidade nula

$v_s$  - velocidade do líquido na saída do orifício [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$\dot{y}_{\max}$  - velocidade de diminuição da poça [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$v^*$  - velocidade do vento adimensional [adimensional]

$W$  - massa específica linear [ $\text{lb.ft}^{-1}$ ]

$W'$  - massa específica linear do gesso [ $\text{lb.ft}^{-1}$ ]

$W_g$  - fração mássica do gás na mistura estequiométrica com o ar [adimensional]

$W_s$  - massa do aço [kg]

$\alpha$  - coeficiente de transferência de calor [ $\text{W.m}^{-1}$ ]

$\alpha_c$  - porção convectiva da transferência de calor [ $\text{W.m}^{-1}$ ]

$\alpha_r$  - porção radiativa da transferência de calor [ $\text{W.m}^{-1}$ ]

$\beta$  - ângulo de inclinação da chama de um incêndio em poça devido a ação do vento [graus]

$\delta$  - espessura da subdivisão na variável espacial, [m]

$\Delta H_c$  - calor de combustão do gás [ $\text{J.kg}^{-1}$ ]

$\Delta H_v$  - calor de vaporização do líquido na temperatura ambiente [ $\text{J.kg}^{-1}$ ]

$\Delta H^*$  - calor de vaporização modificado [ $\text{J.kg}^{-1}$ ]

$\Delta t$  - variação do tempo [s]

$\Delta T_s$  - variação de temperatura no aço [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\gamma$  - razão entre as capacidades caloríficas do gás a pressão e a volume constantes [adimensional]

$\varepsilon_s$  - emissividade da superfície [adimensional]

$\varepsilon_c$  - emissividade da chama [adimensional]

$\theta$  - ângulo de interesse que o jato forma com o solo [graus]

$\theta^*$  - temperatura adimensional [ad]

$\rho$  - massa específica do sólido [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$  - taxa de variação com o tempo da energia sensível térmica do meio por unidade de

volume

$\rho_a$  - massa específica do ar [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

$\rho_c$  - massa específica do concreto [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

$\rho_g$  - massa específica do gás a montante do bocal [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

$\rho_i$  - massa específica do material de isolamento [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

$\rho_j$  - massa específica do gás na saída do bocal [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

$\rho_l$  - massa específica do fluido [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

$\sigma$  - constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67 \cdot 10^{-8}$  [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ];

$\psi$  - coeficiente crítico [adimensional]

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 – Diagrama de eventos devido a liberação de material inflamável _____	2
Figura 2-1 – Diagrama de blocos da unidade de craqueamento catalítico _____	10
Figura 3-1 – Cenário de acidente 01 _____	15
Figura 3-2 – Cenário de acidente 02 _____	16
Figura 3-3 – Cenário de acidente 03 _____	17
Figura 3-4 – Cenário de acidente 04 _____	17
Figura 3-5 – Cenário de acidente 05 _____	18
Figura 3-6 – Cenário de acidente 06 _____	19
Figura 4-1 - Principais características a serem determinadas em um jato de fogo _____	21
Figura 4-2 – Comportamento do jato gasoso na saída de um bocal _____	25
Figura 4-3 – Área vulnerável a jato de fogo para cenário de acidente 01 _____	28
Figura 4-4 – Área vulnerável a jato de fogo para cenário de acidente 02 _____	29
Figura 4-5 – Área vulnerável a jato de fogo para cenário de acidente 03 _____	30
Figura 4-6 – Área vulnerável a jato de fogo para cenário de acidente 05 _____	31
Figura 4-7 – Área vulnerável a jato de fogo para cenário de acidente 06 _____	32
Figura 4-8 – Chama cilíndrica em um incêndio em poça _____	34
Figura 4-9 – Relação entre velocidade de queima e diâmetro da poça para diversos hidrocarbonetos – Fonte: Lees, 1996 _____	36
Figura 4-10 - Principais características a serem determinadas em um incêndio em poça _____	40
Figura 4-11 – Área vulnerável a jato de fogo para cenário de acidente 04 _____	42
Figura 6-1 – Proteção de estruturas com materiais aplicados na forma de <i>spray</i> _____	49
Figura 6-2 – Estrutura revestida com manta cerâmica _____	49
Figura 6-3 – Estrutura recoberta com concreto _____	50
Figura 6-4 – Forma de proteção de estruturas utilizando concreto _____	50
Figura 6-5 – Mecanismos de ligação para aplicação de materiais na forma de placas _____	51
Figura 7-1 – Curva tempo-temperatura apresentada na norma ASTM E-119 _____	57
Figura 7-2 – Perímetro de aquecimento _____	62
Figura 7-3 – Cilindro oco utilizado na simulação onde $R_{int}$ é o raio interno e $R_{ext}$ é o raio externo _____	66
Figura 7-4 – Representação da discretização por diferenças finitas num cilindro oco _____	67
Figura 8-1 – Elementos estruturais a serem protegidos: coluna de seção circular (seta vermelha) e bandeja de cabos com seção retangular (seta azul) _____	72
Figura 8-2 – Elemento estrutural a ser protegido: coluna de seção em I (seta vermelha) _____	73

Figura 8-3 – Dimensões do perfil I _____	74
Figura 8-4 – Tempo que a estrutura de perfil cilíndrico leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Placas de gesso _____	80
Figura 8-5 – Tempo que a estrutura de perfil retangular leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Placas de gesso _____	81
Figura 8-6 – Tempo que a estrutura de perfil em I leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Placas de gesso _____	81
Figura 8-7 – Tempo que a estrutura de perfil cilíndrico leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Materiais aplicados na forma de spray _____	82
Figura 8-8 – Tempo que a estrutura de perfil retangular leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Materiais aplicados na forma de spray _____	82
Figura 8-9 – Tempo que a estrutura de perfil em I leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Materiais aplicados na forma de spray _____	83
Figura 8-10 – Tempo que a estrutura de perfil cilíndrico leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Recobrimento com concreto – Proteção tipo contorno _____	83
Figura 8-11 – Tempo que a estrutura de perfil cilíndrico leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Recobrimento com concreto – Proteção tipo caixa _____	84
Figura 8-12 – Tempo que a estrutura de perfil retangular leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Recobrimento com concreto – Proteção tipo contorno _____	84
Figura 8-13 – Tempo que a estrutura de perfil retangular leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Recobrimento com concreto – Proteção tipo caixa _____	85
Figura 8-14 – Tempo que a estrutura de perfil em I leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Recobrimento com concreto – Proteção tipo contorno _____	85
Figura 8-15 – Tempo que a estrutura de perfil em I leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Recobrimento com concreto – Proteção tipo caixa _____	86
Figura 8-16 – Perfil de temperatura em função do tempo para perfil cilíndrico protegido com uma camada de 16 mm de argamassa projetada usando o método numérico onde o tempo, em minutos, é dado por $\frac{0.48 \cdot n}{60}$ _____	88

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3-1 – Cenários de acidente a serem analisados _____	13
Tabela 4-1 – Resultados para comprimento de jato de fogo _____	26
Tabela 4-2 - Resultados para cenário de acidente de incêndio em poça _____	41
Tabela 7-1 – Relações empíricas para cálculo da resistência de elementos de aço _____	60
Tabela 8-1 – Avaliação do tempo para o elemento estrutural sem proteção passiva contra incêndio atingir 550°C _____	74
Tabela 8-2 – Avaliação da espessura da proteção passiva necessária para que o elemento estrutural não atinja a temperatura de 550°C no tempo de 120 min _____	79
Tabela 8-3 – Avaliação da espessura da proteção passiva, para alguns materiais, para que o elemento estrutural atinge a temperatura de 550°C no tempo acima de 120 min por método numérico _____	88
Tabela 8-4 – Comparação entre os materiais de isolamento térmico para as diversas seções com respeito apenas ao tempo, em minutos, até que a estrutura atinja a temperatura crítica para espessura do material de proteção de 25,4 mm _____	90

## 1 INTRODUÇÃO

Nesta seção serão apresentados a justificativa, os objetivos que nortearam esta dissertação e uma breve descrição do problema estudado. A revisão bibliográfica está inserida ao longo do corpo da dissertação.

### 1.1 Motivação

Atualmente, um dos principais problemas relativos à segurança de plantas de processos químicos e/ou petroquímicos é o acidente envolvendo fogo nas instalações com potencial de causar danos não somente a vida humana, mas também a propriedade. Portanto, é essencial identificar os possíveis locais de ocorrência e que se conheçam as causas de incêndios, bem como o seu desenvolvimento. É evidente que em unidades industriais contendo hidrocarbonetos é prioritário se ter controle e medidas de segurança capazes de reduzir os impactos resultantes de incêndio.

Geralmente, o incêndio ocorre devido a uma liberação acidental de um líquido ou gás inflamável seguida de ignição, em algum ponto da instalação. Estas liberações podem ser ocasionadas devido a vazamentos em tanques, filtros, bombas ou em qualquer outro tipo de acessório ao longo da tubulação bem como na própria tubulação, no interior dos quais se tenha material inflamável.

A combustão de um fluido inflamável liberado acidentalmente numa planta industrial pode ocorrer sob diversas formas. Por exemplo, a liberação de um gás ou líquido inflamável pode entrar em ignição no ponto de saída do escoamento e conseqüentemente formar um jato de fogo. Quando ocorre a exposição direta à chama ou quando se verificam exposições a fluxos térmicos por períodos de tempo longos o suficiente, pode haver aumento da temperatura do equipamento para níveis altos o suficiente para ocorrência de dano. Uma outra situação típica decorre de danos à estrutura de sustentação do equipamento ou do piso onde está localizado o equipamento, neste caso diz-se que o dano é indireto, pois o colapso da estrutura de sustentação é que leva o dano ao equipamento.

Além do dano ao equipamento em si, é comum que acidentes levem à perda de contenção de mais material inflamável, levando a um agravamento da situação com ampliação das dimensões do sinistro que, em alguns casos, pode chegar à perda integral das instalações. Este fenômeno é conhecido, tradicionalmente, por *Efeito Dominó*.

Se o derramamento for capaz de formar uma nuvem de vapor, liberado por algum tempo antes de entrar em ignição, o efeito resultante poderá ser um incêndio em nuvem ou uma explosão em nuvem. Quando a liberação de um líquido inflamável forma uma poça no solo

havendo ignição tem-se um incêndio em poça e a chama formada, neste caso, é localizada; os danos resultantes são devido a contato direto ou pelo calor de radiação térmica da chama. Contudo, se este incêndio em poça engloba, por exemplo, um tanque pressurizado de armazenagem de material inflamável, um BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion – Explosão de Vapor por Expansão de Líquido Fervente*) seguido de bola de fogo poderá também resultar.

Há diversas possibilidades de cenários de acidente no caso de liberação de material inflamável a partir de um tanque pressurizado ou de uma tubulação de qualquer parte de um processo. A pressurização pode ser devido a condições normais de operação ou por ação externa. A liberação do material inflamável pode ocorrer em consequência de uma falha maior como ruptura catastrófica do tanque ou por uma falha menor como um vazamento em uma linha. A figura 1.1 a seguir contém um diagrama ilustrativo das diversas possibilidades de desdobramentos de uma liberação de material inflamável.

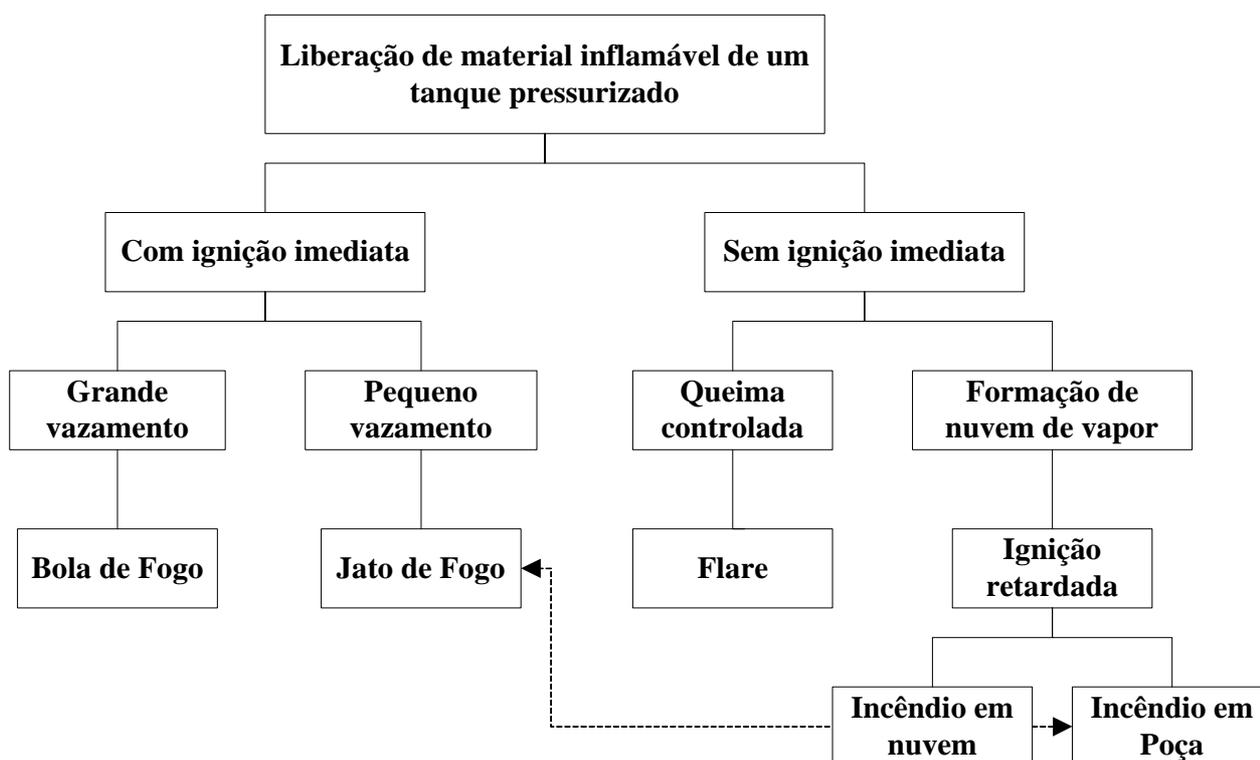


Figura 1-1 – Diagrama de eventos devido a liberação de material inflamável

Diversos sistemas de proteção contra incêndio em instalações industriais têm sido desenvolvidos com o intuito de fornecer medidas de segurança tanto de bens materiais quanto para a vida de pessoas. Basicamente, existem dois tipos de proteção contra incêndio comumente chamadas de proteção ativa e passiva.

A proteção ativa contra incêndio de uma dada instalação somente é operacional quando são acionados os elementos capazes de promover o combate ao fogo. Os principais elementos constituintes da proteção ativa, para instalações não confinadas, são:

- (a) Sistemas de alerta de incêndio como sirenes;
- (b) Sistemas de detecção de incêndio como detectores de fumaça e de chama;
- (c) Agentes de combate a incêndio como *sprinklers*, mangueiras, caminhões-tanque;
- (d) Sistemas de fornecimento de água como redes de hidrantes;
- (e) Sistemas de combate a incêndio fixos como canhões fixos;
- (f) Sistemas de combate a incêndio móveis ou fixos com LGE (líquido gerador de espuma).

A proteção passiva pode ser definida como sendo um conjunto de medidas e de critérios de projeto cuja aplicação tem a finalidade de evitar, isolar, ou retardar a ação do fogo ou calor excessivo independentemente da ação de pessoas ou equipamentos.

O sistema de proteção passiva contra incêndio pode ser definido também como sistema de prevenção, pois considera medidas de controle e segurança que minimizem a ocorrência de incêndio e a área de abrangência deste evento. Portanto, pode-se afirmar que a proteção passiva possui uma grande vantagem sobre a proteção ativa, pois é menos dependente tanto dos equipamentos quanto de fatores humanos que são ambos passíveis de falhas. Desta forma, a proteção passiva é menos vulnerável a falhas no controle da emergência.

Segundo Oliveira, 1993, o objetivo da aplicação da proteção passiva é proporcionar uma maior eficiência ao combate e propagação do incêndio, eliminando diversos fatores de contingência existentes nos sistemas ativos, que possibilitam prejuízos de grandes proporções como perdas humanas e patrimoniais além de exigir investimento e custo operacional altíssimos. O sistema de proteção passiva pode ser utilizado em vários casos, mas o seu uso em elementos estruturais a fim de evitar o colapso dos mesmos durante o incêndio é o mais comum.

Um dos principais métodos de proteção passiva disponíveis é o revestimento de superfícies com materiais resistentes ao fogo denominados *fireproofing*. A vantagem deste sistema é a mesma já mencionada, já as desvantagens são que estes materiais podem facilitar corrosão nas superfícies com as quais estejam em contato e estando esta corrosão oculta pelo revestimento pode haver dificuldade na detecção, além disto, tem-se também o fato de que o revestimento pode ser danificado por ação dos jatos de água usados para extinção do fogo. Portanto, estes materiais devem possuir algumas características que minimizem estes efeitos desfavoráveis. Estas características serão discutidas posteriormente. Desta forma, a proteção passiva se constitui, basicamente, da aplicação de materiais que garantam a proteção de sistemas

expostos a altas temperaturas durante um período de tempo pré-estabelecido. De acordo com Oliveira, 1993, atualmente, a aplicação destes materiais é efetuada apenas em determinadas áreas prioritárias e, portanto, o seu custo é bastante reduzido representando, no máximo, 3 a 4% do custo do equipamento e/ou unidade de processo.

Uma outra possibilidade de proteção passiva é o uso de barreiras de proteção revestidas com materiais com características de bloqueio ou retardamento do fogo para áreas de maior importância para uma eventual parada de emergência da unidade. Desta forma, pode-se racionalizar o uso da proteção passiva para as áreas mais importantes dentro da unidade fazendo com que os custos de implantação da proteção passiva sejam reduzidos.

A solução ótima para a proteção contra fogo é, normalmente, uma combinação de sistema de proteção ativa e passiva. Frequentemente, a proteção passiva pode limitar a área aonde o fogo irá se espalhar e, com isto pode-se “ganhar tempo” enquanto os recursos materiais e humanos são mobilizados para o controle da emergência. Ou seja, a proteção passiva, em função do desenvolvimento dos materiais e métodos de utilização não leva necessariamente à substituição completa da proteção ativa, mas induz uma racionalização e/ou otimização dos dois sistemas.

## **1.2 Objetivos**

Com base no exposto anteriormente, os objetivos desta dissertação são:

- Estudar e propor a proteção passiva contra incêndio visando garantir a estabilidade de estruturas metálicas e permitir que os procedimentos de parada de emergência sejam executados de forma mais segura
- Usar uma técnica de análise de riscos (Análise de Vulnerabilidade) para se determinar mais precisamente quais as áreas que devem ser protegidas visando racionalizar o uso método de proteção.
- Determinar a espessura da proteção passiva de estruturas e sistemas elétricos com o uso de diversos materiais usados comercialmente com base em equações empíricas desenvolvidas por Jeanes, 1980, Stanzak, 1973 e PABCO, 1984, e, para alguns casos particulares far-se-á a resolução por solução numérica da equação da condução do calor em meio sólido
- Escolher qual material de proteção passiva contra incêndio é o mais adequado para cada caso do estudo em função da espessura, forma de colocação, custo, etc.

### **1.3 Descrição do Problema**

A unidade de craqueamento catalítico de uma refinaria de petróleo foi escolhida para estudo aonde irá se investigar os principais pontos críticos onde poderão ocorrer acidentes com conseqüente formação de jatos de fogo e/ou incêndio em poça e propor soluções de proteção térmica dos elementos pertencentes ao interior da área potencialmente afetada. Para tal as seguintes etapas foram necessárias para realização deste estudo:

#### **1. *Pontos críticos com potencial de gerar jatos de fogo e/ou incêndio em poça***

Um levantamento preliminar dos pontos críticos com potencial de gerar acidentes com formação de jatos de fogo e/ou incêndio em poça foi realizado, inicialmente, em reuniões com o corpo técnico da unidade de craqueamento catalítico. O objetivo foi a investigação de algumas áreas potencialmente sujeitas a emergências do porte a que este estudo se propõe. Logo após, um estudo mais aprofundado da unidade foi realizado com base em visitas às instalações, estudo dos fluxogramas de processo, das variáveis de processo em cada ponto da unidade (tais como pressão, temperatura, vazão, composição, estado físico), de relatórios de acidente, dos planos de emergência e em entrevista com alguns operadores.

#### **2. *Modelos de jatos de fogo e incêndio em poça***

Nesta fase do trabalho, fez-se um estudo dos modelos de jatos de fogo e incêndio em poça existentes na literatura para determinação das principais características destes fenômenos, comprimento no caso de jatos de fogo e altura no caso de incêndio em poça. Dentre os modelos apresentados na literatura, foram selecionados alguns que apresentam resultados satisfatórios e comumente usados para cálculo de efeitos físicos para acidentes relacionados com jato de fogo e incêndio em poça. Estes modelos serão apresentados no capítulo 4 deste trabalho.

#### **3. *Estruturas potencialmente sujeitas a danos por jato de fogo e/ou incêndio em poça***

O levantamento das estruturas contidas em cada região potencialmente sujeita a jato de fogo e/ou incêndio em poça foi realizado nesta etapa do presente estudo. Esta etapa consistiu em identificar os elementos que deveriam ser protegidos termicamente contra incêndios no interior de cada região potencialmente afetada por efeitos térmicos. Esta identificação foi realizada através de inspeção visual na unidade de craqueamento e também de uma combinação dos resultados obtidos na etapa 2 com o *layout* da instalação.

#### **4. *Proteção térmica passiva contra incêndio***

Para os diversos pontos (estruturas e/ou sistema elétrico) da unidade potencialmente sujeitos à exposição ao fogo, fez-se um estudo de soluções de proteção térmica passiva. A solução proposta para cada caso de interesse baseou-se em pesquisas na literatura a fim de se determinar o material mais adequado para proteção térmica e na realização de cálculos de fluxo

térmico segundo teorias plenamente estabelecidas. Também se calculou a espessura necessária para garantir proteção térmica para um período de tempo pré-estabelecido de duas horas.

Além disso, é claro que, quando possível, também se pode buscar soluções mais simples tais como troca da posição da bandeja de cabos elétricos das posições atuais para outras mais seguras, determinada com base nas áreas vulneráveis obtidos para incêndios nas áreas.

##### **5. *Material de proteção térmica passiva adequado***

Como resultado final deste trabalho, determinou-se uma das soluções técnicas possíveis para a proteção de estruturas e para o sistema elétrico contra fogo nas instalações da unidade de craqueamento catalítico de uma refinaria. Os resultados desejados englobam a escolha dos materiais de proteção para cada ponto crítico da análise e o dimensionamento da espessura deste material.

## 2 UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO - FCC

Neste capítulo será feita uma breve descrição da unidade estudada. Após uma descrição do que vem a ser o craqueamento catalítico, tem-se uma descrição da unidade em termos de seus principais componentes e segue-se uma caracterização das principais correntes envolvidas na unidade. O craqueamento catalítico, segundo Abadie, 2003, é um processo de refino de petróleo que visa aumentar a produção de gasolina e GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) de uma refinaria através da conversão de frações pesadas, provenientes da destilação de petróleo (gasóleos + resíduos), em frações mais leves. Originalmente, os processos de craqueamento surgiram da necessidade de produção de gasolina em quantidade e qualidade suficiente de modo a atender à crescente demanda, em face ao crescimento da indústria automobilística dos Estados Unidos.

Em 1913, toda a gasolina produzida era obtida por destilação direta do petróleo, portanto, tanto a qualidade como a quantidade dependiam unicamente do petróleo cru. Como existia grande variedade de petróleos, havia também uma grande variação no rendimento e na qualidade das gasolinas. Ou seja, a quantidade maior ou menor de enxofre presente no petróleo irá fazer com que o rendimento e a qualidade do produto final também variem.

A partir da necessidade de melhoria na qualidade e quantidade de gasolina para suprir a indústria automobilística americana, começaram a surgir processos comerciais de craqueamento. Inicialmente, tem-se o craqueamento térmico e mais tarde, o processo passou para a versão catalítica em leito fixo, móvel ou fluidizado. Esta última concepção desenvolveu-se de forma extraordinária até atingir o estágio onde hoje se encontra. Pode-se dizer que o craqueamento catalítico é praticamente imprescindível para às refinarias modernas.

O FCC (*Fluid Catalytic Cracking*) é um processo largamente difundido em todo o mundo devido a dois fatores. Primeiramente, o fato de contribuir eficazmente com a refinaria no sentido de ajustar à produção às necessidades reais do mercado consumidor local pela sua grande flexibilidade operacional. E, também por questões econômicas, pois é capaz de transformar frações residuais, de baixo valor comercial, em derivados nobres de alto valor como gasolina e GLP.

Concebido originalmente para o processamento de gasóleos, o FCC está migrando atualmente para o craqueamento de resíduo atmosférico. Isto devido ao, ainda, menor valor comercial dessa fração o que conseqüentemente, leva a maior rentabilidade para a refinaria. Para tal, o desenvolvimento de novos catalisadores de maior eficiência, bem como inovações e concepções mais arrojadas no projeto básico permitem a evolução do processo.

## 2.1 Descrição do processo

O processo de craqueamento catalítico consiste na quebra (*cracking*) de moléculas pesadas presentes nos gasóleos e resíduos, por ação de um catalisador a base de aluminossilicatos, em altas temperaturas. A ruptura das ligações possibilita o aparecimento de moléculas leves, principalmente compostos de 3 a 12 átomos de carbono (GLP e gasolina) devido a seletividade do catalisador empregado. A reação provoca também a formação, em menor escala, de gases leves (C1 e C2), gasóleos leve e pesado e coque, sendo que este último deposita-se na superfície do catalisador.

A deposição de coque provoca a desativação do catalisador devido a uma considerável redução da área disponível aos reagentes. Com o objetivo de restaurar-se esta atividade, o catalisador inativo pelo coque é continuamente retirado do reator e enviado ao vaso de regeneração. Por intermédio de uma injeção de ar e a alta temperatura, o coque é queimado, restabelecendo a atividade catalítica. O conjunto reator-regenerador é denominado *converter*.

Os gases de craqueamento que saem do reator são encaminhados ao fracionamento onde, por intermédio, de uma torre de destilação é promovida a separação primária das frações. Pelo fundo desta torre, produz-se um óleo pesado bastante denso denominado *resíduo de craqueamento*. Esta corrente também é conhecida como óleo decantado ou óleo clarificado.

A fracionadora produz, como corrente lateral, um óleo leve de faixa de ebulição semelhante ao diesel conhecido como *óleo leve de reciclo – LCO* ou *diesel de craqueamento*. Pelo topo, sai uma corrente gasosa composta de nafta de craqueamento (gasolina) e de hidrocarbonetos mais leves. Esta corrente pode ser dividida em duas: a gasosa composta de hidrocarbonetos leves (C1, C2, C3 e C4) e uma líquida constituída de nafta instabilizada devido a grande quantidade de leves dissolvidos. Estas duas correntes são enviadas a seção de recuperação dos gases.

A recuperação dos gases tem por finalidade o processamento das correntes de gases e de nafta instabilizada e dela separar três frações distintas: o gás combustível (C1 e C2), o gás liqüefeito (C3 e C4) e a nafta de craqueamento (C5 a C12). Estas correntes são enviadas às respectivas seções de tratamento onde, por intermédio, de produtos químicos tais frações têm seus teores de enxofre consideravelmente reduzidos. Os processos utilizados são o tratamento com di-etanol-amina (DEA) para remoções de ácido sulfídrico do gás combustível e do GLP e o tratamento cáustico regenerativo (Merox) que remove mercaptanas do GLP e da nafta de craqueamento (gasolina). Após estas operações, as frações são destinadas à estocagem.

Uma corrente de gás ácido, proveniente do tratamento com DEA, rica em ácido sulfídrico, é normalmente enviada à Unidade de Recuperação de Enxofre (URE) onde através de uma queima controlada da corrente gasosa, produz-se enxofre elementar.

Os gases da combustão, provenientes da queima do coque durante a regeneração do catalisador, saem desta etapa em elevadas temperaturas. Tendo em vista o aproveitamento energético dessa corrente, esta é encaminhada a caldeira para recuperação do calor na geração de vapor d'água de alta pressão e desta forma, estes gases de combustão são resfriados antes de serem lançados à atmosfera.

A figura 2.1 a seguir mostra um diagrama de blocos do processo de craqueamento catalítico descrito anteriormente.

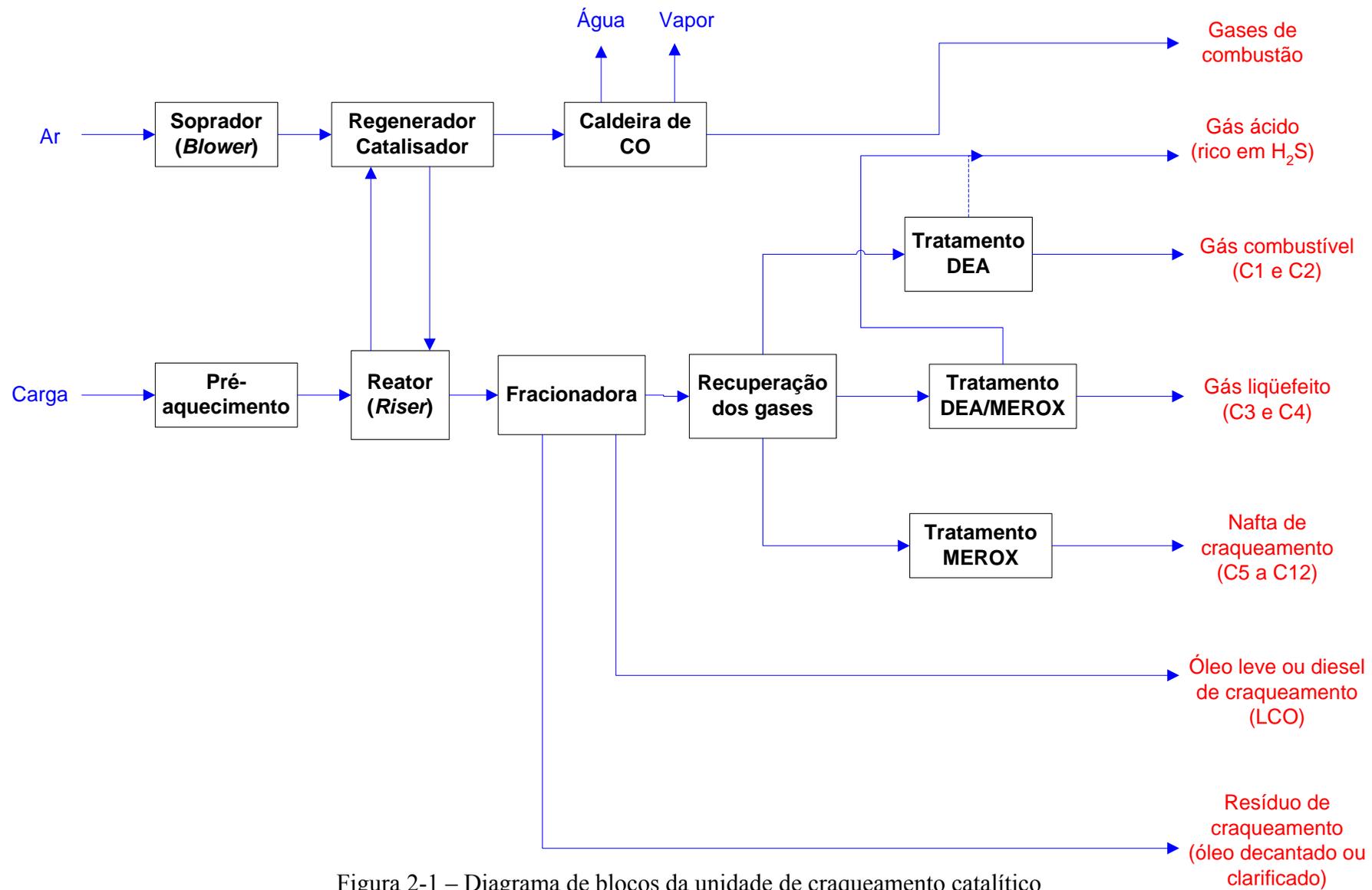


Figura 2-1 – Diagrama de blocos da unidade de craqueamento catalítico

## 2.2 Produtos do craqueamento catalítico

**Gás Combustível (GC):** é composto, basicamente, de hidrogênio, metano, etano e eteno. Além desses pode-se encontrar, em frações menores, outros gases como: propano, propeno, n-butano, iso-butano, n-butenos, iso-butenos, monóxido de carbono, dióxido de carbono e nitrogênio. Sendo que os três últimos compostos citados são provenientes do arraste do gás de combustão pelo catalisador regenerado. Antes de sair da unidade, esta mistura gasosa é tratada com DEA, que remove ácido sulfídrico, o qual, por sua vez, é utilizado como matéria-prima na fabricação de enxofre elementar. O craqueamento catalítico é o principal produtor de gás combustível em uma refinaria e devido ao seu alto poder calorífico, sua facilidade de queima, seu caráter antipolvente (em virtude do baixo teor de enxofre) e, sobretudo porque se não aproveitado será queimado na tocha, o gás combustível é largamente consumido nos fornos e nas caldeiras das diversas unidades de uma refinaria de petróleo.

**Gás Liquefeito de Petróleo (GLP):** o GLP de craqueamento é composto basicamente de propano, propeno, butanos e butenos. Em menores proporções, ocorre também a presença de etano e pentanos. De forma similar ao gás combustível, também há ocorrência de ácido sulfídrico, que é eliminado com tratamento com DEA. Outros compostos de enxofre podem estar presentes, como as mercaptanas, tendo seus teores reduzidos através do tratamento Merox. O tratamento Merox se aplica, basicamente, à frações leves de GLP e nafta de craqueamento e baseia-se na extração cáustica de mercaptanas presentes na corrente, com posterior oxidação a dissulfetos, ao mesmo tempo em que a solução cáustica é regenerada. Esta unidade é também a principal responsável pela geração do gás liquefeito nas refinarias. Seu maior emprego é como combustível doméstico e, eventualmente, industrial. Parte do GLP produzido pode ser fracionado dentro da unidade e decomposto em duas correntes (propanos e butanos), quando há interesse na utilização desses gases como matérias-primas petroquímicas.

**Nafta de Craqueamento (Gasolina):** a nafta produzida, devido a sua composição, é um excelente componente para a produção de gasolina. Ela é rica em olefinas, isoparafinas e aromáticos, sendo pobre em naftênicos e n-parafinas. Esta proporção de hidrocarbonetos conduz a uma gasolina de bom índice de octanagem<sup>1</sup>, da ordem de 81-82 MON<sup>2</sup> (92-95 RON<sup>3</sup>), bastante superior aos valores de naftas de destilação e de processos térmicos de conversão. Em face ao alto teor de olefinas, em determinadas situações pode atingir até 50% em volume, a gasolina de

---

1 Octanagem ou número de octanos (NO) é a propriedade do combustível que representa sua capacidade de resistir à compressão sem entrar em auto-ignição.

2 Método MON (Motor Octane Number ou método Motor – ASTM D2700): avalia a resistência à detonação da gasolina na situação em que o motor está em plena carga e em alta rotação.

3 Método RON – (Research Octane Number ou método Pesquisa – ASTM D-2699): avalia a resistência à detonação da gasolina na situação em que o motor está carregado e em baixa rotação (até 3000 rpm).

craqueamento tem uma elevada tendência a formação de gomas e um baixo período de indução. Para minimizar a formação de gomas, injeta-se na saída do produto para estocagem, um inibidor que atua retardando a oxidação e polimerização das olefinas. O teor de enxofre da nafta de craqueamento é alto, necessitando submetê-la a um tratamento cáustico regenerativo (Mercox) para a redução do índice de enxofre.

**Gasóleos:** são oriundos das moléculas não convertidas da carga original (gasóleo de vácuo). Possuem um teor razoável de cadeias aromáticas de alto peso molecular devido a impossibilidade do catalisador romper os anéis benzênicos. São separados em três frações conforme as faixas de destilação: a mais leve conhecida como óleo leve de reciclo, a fração intermediária conhecida como óleo pesado de reciclo e a fração mais pesada conhecida como óleo clarificado ou decantado.

**Óleo Leve de Reciclo (LCO):** o óleo leve de reciclo (*Light Cycle Oil*) é uma fração cuja faixa de destilação é, aproximadamente, a do óleo diesel. É constituído de uma elevada concentração de aromáticos bi e trinucleados com ramificações, além de grandes quantidades de olefinas e diolefinas de longas cadeias. Por apresentar uma faixa de destilação compatível com a do óleo diesel, é adicionado a este, desde que o teor de enxofre o permita. Quando não for possível, o LCO é utilizado para acerto de viscosidade de óleos combustíveis.

**Óleo Pesado de Reciclo (HCO):** o óleo pesado de reciclo (*Heavy Cycle Oil*) apresenta faixa de destilação que se enquadra como um óleo combustível de baixa viscosidade.

**Óleo Clarificado ou Decantado (CLO):** devido a sua alta concentração de núcleos aromáticos policondensados com algumas ramificações e olefinas pesadas também ramificadas, pode ser utilizado como matéria-prima para obtenção de negro-de-fumo (carga para produção de pneus, plásticos, pigmentos pretos, etc.) ou coque de petróleo (produção de eletrodos de grafite).

**Coque:** são cadeias poliméricas de altos pesos moleculares e elevadas percentagens de carbono que se depositam na superfície do catalisador diminuindo sua eficiência. Para restabelecer a atividade do catalisador, o coque é queimado no regenerador e, da sua combustão, é gerado todo o calor necessário ao processo.

### 2.3 Resumo

Com base na descrição apresentada neste capítulo da unidade de craqueamento catalítico de uma refinaria de petróleo, vê-se claramente que praticamente todas as correntes são constituídas de materiais combustíveis. Portanto, vazamentos na unidade seguido de ignição imediata ou retardada representam sérias ameaças à integridade de estruturas ou sistemas elétricos não protegidos adequadamente para caso de incêndio.

### 3 IDENTIFICAÇÃO E ESCOLHA DOS CENÁRIOS ANALISADOS

Neste capítulo será descrita a forma de identificação e escolha dos cenários para análise neste estudo seguido de sua caracterização. A técnica utilizada para escolha dos cenários de acidente analisados neste trabalho foi a pesquisa em documentos relacionados com a identificação e avaliação de situações de emergência na unidade de FCC, bem como nos procedimentos de ação em emergências. Visitas no local e reuniões com a equipe técnica da unidade como gerência de craqueamento, engenheiros de processo, operadores foram também importantes neste levantamento de dados. Os documentos, acima citados e utilizados nesta análise foram elaborados pela própria refinaria e são de propriedade desta.

#### 3.1 Cenários analisados

De posse do levantamento realizado conforme recém descrito, identificou-se 6 cenários de acidente para análise, sendo cinco referente a jato de fogo e um de incêndio em poça. O número de cenários de acidente com jato de fogo é superior ao de incêndio em poça, pois, nesta unidade o estado físico predominante das substâncias envolvidas é o gasoso.

Os cenários de acidente listados na tabela 3.1 a seguir foram os selecionados para a análise de estimativa de efeitos físicos e delimitação de área vulnerável na unidade de craqueamento catalítico.

Tabela 3-1 – Cenários de acidente a serem analisados

Cenário	Descrição	Efeito
1	Vazamento de gases de craqueamento por ruptura da junta do flange, na saída do 2º estágio do compressor de gases	Jato de fogo
2	Vazamento de gás combustível na entrada da torre absorvedora primária	Jato de fogo
3	Vazamento de GLP na saída da debutanizadora	Jato de fogo
4	Vazamento de nafta de craqueamento (gasolina) pela bomba de refluxo da absorvedora primária	Incêndio em poça
5	Vazamento de gás combustível devido a falha em juntas e/ou flanges no tratamento com DEA	Jato de fogo
6	Vazamento de GLP devido a falha em juntas e/ou flanges no tratamento com Merox/DEA	Jato de fogo

Ainda que na tabela 3.1 se tenha a definição de um ponto exato onde se poderia ocorrer o acidente, para fim de delimitação da área na qual os equipamentos poderiam sofrer danos por exposição a jato de fogo, por exemplo, usou-se a linha inteira como possível origem do jato. Assim, uma vez definido o comprimento do jato de fogo se tem uma faixa de largura

igual a duas vezes o comprimento do jato centrada na linha, dentro da qual haveria exposição direta ao fogo. Estas áreas serão apresentadas no capítulo 4 deste trabalho.

As definições de quais as formas de perda de contenção a considerar e realizar as simulações foram feitas com base no “*Guidelines for Quantitative Risk Assessment – Purple Book*” que prescreve diversas formas de perda de contenção, conforme o equipamento ou tubulação em estudo. Para tubulações, dois cenários de perda de contenção foram simulados: ruptura total da linha e vazamento por um orifício com 10% do diâmetro da tubulação até o máximo de 50 mm. É importante dizer que, no caso de ruptura total, a vazão de saída do gás para formação do jato de fogo é limitada pela vazão volumétrica do gás na linha, portanto, para efeitos de cálculo determinou-se o diâmetro correspondente a um vazamento com esta vazão para obter-se o comprimento do jato, que serão apresentados a posteriori.

Com base nestes dois tipos de cenários, sabendo-se a localização do vazamento e calculando-se os efeitos físicos decorrentes dos mesmos, isto é, a dimensão da chama em caso de incêndio em poça e alcance do jato de fogo, será possível estabelecer quais as estruturas que poderiam ser atingidas pelas chamas.

### **3.1.1 Cenário de acidente 01: Vazamento de gases de craqueamento por ruptura da junta do flange, na saída do 2º estágio do compressor de gases**

Neste cenário de acidente, foi considerado o vazamento de gases de craqueamento devido a ruptura da junta do flange de 10 polegadas de diâmetro, que está localizada na saída do compressor de gases, tendo como consequência, a formação de jato de fogo. Os gases de craqueamento são os gases provenientes do reator, sendo constituídos por uma mistura de hidrocarbonetos que podem ter de um a doze carbonos, mais vapor d’água e gases inertes.

Para fins de simulação deste cenário, utilizou-se como gás de liberação o propano, pois as características de jatos formados por queima de hidrocarbonetos são bastante semelhantes. A pressão de operação neste ponto do processo é de  $14,9 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , a temperatura é de  $108^\circ\text{C}$  e a vazão volumétrica é de  $2320 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ . A figura 3.1 ilustra este cenário de acidente onde a seta vermelha indica o provável ponto de liberação.



Figura 3-1 – Cenário de acidente 01

### 3.1.2 Cenário de acidente 02: Vazamento de gás combustível na entrada da torre absorvedora primária

Neste cenário de acidente, foi considerado o vazamento de gás combustível devido a ruptura da linha (ou de componentes) de 4 polegadas de diâmetro na entrada da torre absorvedora primária, tendo como consequência, a formação de jato de fogo. O gás combustível é formado basicamente de hidrogênio, metano, etano e eteno.

Para fins de simulação deste cenário, utilizou-se como gás de liberação o metano puro, pois este é o componente majoritário na mistura. A pressão de operação neste ponto do processo é de  $14,0 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , a temperatura é de  $62^\circ\text{C}$  e a vazão volumétrica é de  $6000 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ . A figura 3.2 ilustra este cenário de acidente onde a linha está conectada na parte superior da torre.



Figura 3-2 – Cenário de acidente 02

### 3.1.3 Cenário de acidente 03: Vazamento de GLP na saída da debutanizadora

Neste cenário de acidente, foi considerado o vazamento de GLP devido a ruptura da linha (ou de componentes) de 10 polegadas de diâmetro na saída da debutanizadora, tendo como consequência, a formação de jato de fogo.

Para fins de simulação deste cenário, utilizou-se como gás de liberação o propano que é o componente majoritário no GLP. A pressão de operação neste ponto do processo é de  $11,6 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , a temperatura é de  $62^\circ\text{C}$  e a vazão volumétrica é de  $1000 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ . A figura 3.3 a seguir ilustra este cenário de acidente onde a linha está conectada na parte superior da torre.



Figura 3-3 – Cenário de acidente 03

### 3.1.4 Cenário de acidente 04: Vazamento de nafta de craqueamento (gasolina) pela bomba de refluxo da absorvedora primária

Neste cenário de acidente, foi considerado o vazamento de nafta de craqueamento devido a ruptura da linha (ou de componentes) de 4 polegadas de diâmetro na bomba de refluxo da absorvedora primária, tendo como consequência, um incêndio em poça. Para fins de simulação deste cenário, utilizou-se como líquido de liberação o pentano puro, pois este é os componentes majoritários da nafta de craqueamento. A pressão de operação neste ponto do processo é de  $14 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , a temperatura é de  $177^\circ\text{C}$  e a vazão volumétrica é de  $5000 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ . A figura 3.4 a seguir ilustra este cenário de acidente onde a seta vermelha indica o provável ponto de liberação e a elipse a área da poça.



Figura 3-4 – Cenário de acidente 04

### 3.1.5 Cenário de acidente 05: Vazamento de gás combustível devido a falha em juntas e/ou flanges no tratamento com DEA

Neste cenário de acidente, foi considerado o vazamento de gás combustível devido a falha em juntas e/ou flanges no tratamento com DEA de 6 polegadas de diâmetro na saída da torre de tratamento de GC com DEA, tendo como consequência, a formação de um jato de fogo.

Para fins de simulação deste cenário, utilizou-se como gás de liberação o metano puro, pois este é o componente majoritário na mistura. A pressão de operação neste ponto do processo é de  $13,6 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , a temperatura é de  $46^\circ\text{C}$  e a vazão volumétrica é de  $5300 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ . A figura 3.5 a seguir ilustra este cenário de acidente onde a linha está conectada na parte superior da torre.

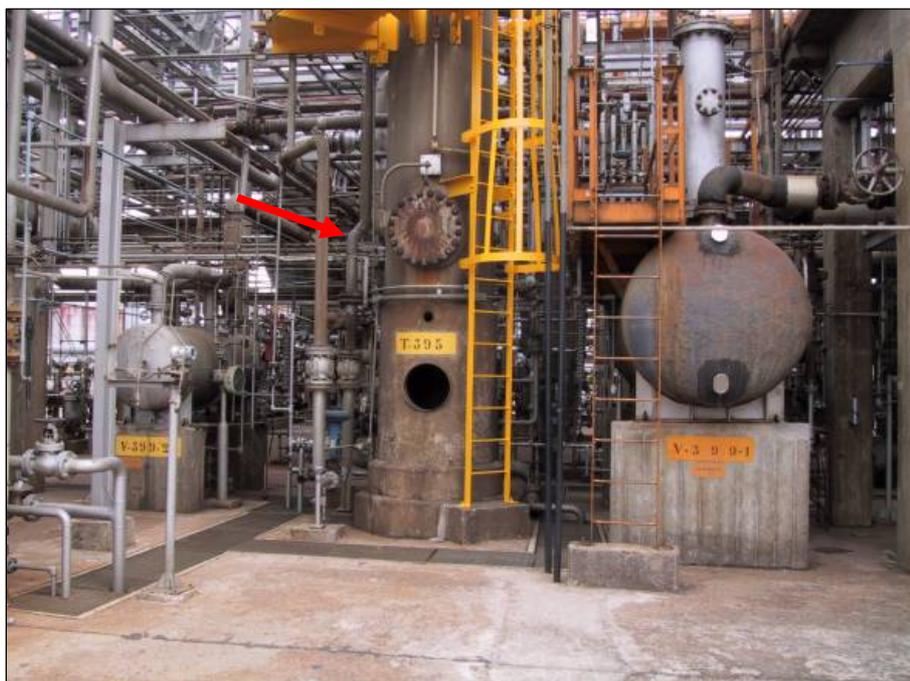


Figura 3-5 – Cenário de acidente 05

### 3.1.6 Cenário de acidente 06: Vazamento de GLP devido a falha em juntas e/ou flanges no tratamento com Merox/DEA

Neste cenário de acidente, foi considerado o vazamento de GLP devido a falha em juntas e/ou flanges no tratamento com DEA de 4 polegadas de diâmetro na saída da torre de tratamento de GLP com DEA, tendo como consequência, a formação de um jato de fogo.

Para fins de simulação deste cenário, utilizou-se como gás de liberação propano, pois é o componente majoritário no GLP. A pressão de operação neste ponto do processo é de  $11,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , a temperatura é de  $43^\circ\text{C}$  e a vazão volumétrica é de  $1000 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ . A figura 3.6 a seguir ilustra este cenário de acidente onde a linha está conectada na parte superior da torre.



Figura 3-6 – Cenário de acidente 06

### 3.2 Resumo

Neste capítulo, foram descritas a forma de identificação e escolha dos cenários para análise na unidade de craqueamento catalítico. A caracterização dos cenários de acidente em que serão avaliados os efeitos físicos para de jato de fogo e incêndio em poça foram também apresentados. A avaliação dos efeitos físicos relacionados a estes eventos é importante para que se possam determinar as áreas potencialmente vulneráveis em caso de acidentes.

## 4 DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE JATO DE FOGO E INCÊNDIO EM POÇA

Neste capítulo serão apresentados os modelos utilizados no dimensionamento das áreas potencialmente sujeitas a jatos de fogo e/ou incêndio em poça bem como, os resultados obtidos para cada um destes cenários. As áreas potencialmente sujeitas a estes eventos estão apresentadas neste capítulo em forma de figuras desenhadas sobre a planta baixa da unidade.

A unidade de craqueamento catalítico é a céu aberto e, portanto, os cenários envolvendo jato de fogo e incêndio em poça se desenvolveram de forma não-enclausurada.

Basicamente, podem-se distinguir quatro situações onde se teriam danos ou por exposição à chama direta ou por fluxos térmicos devido a incêndios: incêndio em nuvem, incêndio em poça, jato de fogo ou tocha e bola de fogo após BLEVE. No presente estudo, somente os casos de incêndio em poça e jato de fogo serão analisados. Isto porque nos outros casos, os danos resultantes ou serão tão grandes que medidas preventivas de proteção de equipamentos e estruturas contra incêndio são totalmente ineficazes ou porque o sistema de proteção passiva não oferece resistência, como no caso de explosão em nuvem, por exemplo.

### 4.1 Jato de Fogo ou Tocha

O jato de fogo, tipicamente, resulta da combustão de um material inflamável liberado de um equipamento de processo pressurizado. Tanto para incêndio em poça quanto para jato de fogo, os efeitos da radiação térmica são localizados. Os modelos de jato de fogo incorporam muitos mecanismos semelhantes aos considerados para incêndio em poça.

Segundo Lees, 1996, há uma grande quantidade de situações no qual o jato de fogo pode ocorrer em um processo industrial, seja pela concepção da instalação ou por um acidente. A principal situação no qual o jato de fogo ocorre devido à concepção são os queimadores e *flares*<sup>4</sup>. Estes casos não serão tratados neste trabalho e sim, aqueles provenientes de acidentes onde houve liberação de gás inflamável de um vaso, tubulação, flange com projeção de um jato de fogo se este entrar em ignição. Uma situação intermediária, com uma particularidade devido ao seu *design*, é o jato de fogo resultante de uma ignição de gás inflamável ejetado de uma válvula de alívio de pressão.

Jato de fogo é bastante comum em acidentes, talvez o mais sério deles tenha sido o que ocorreu na plataforma de petróleo *Piper Alpha*, no Mar do Norte, em 1988. Em outros casos, o jato de fogo devido à ignição de uma liberação de gás inflamável pode causar um superaquecimento e queima dos equipamentos vizinhos dando origem a um BLEVE e,

---

<sup>4</sup> Flare é um dispositivo tradicional em indústrias petroquímicas e de refino de petróleo para queimar de maneira segura gases ou vapores inflamáveis não desejáveis no processo.

posteriormente a uma bola de fogo como o ocorrido na Cidade do México em 1984 segundo Lees, 1996.

Inicialmente, os trabalhos referentes a jatos de fogo estavam concentrados na análise de *flares*, mas posteriormente estudos para entendimento do comportamento de jatos de fogo seguiram-se ao longo do tempo. A liberação de gases, na forma de jatos livres turbulentos, foi estudada por vários pesquisadores, sendo que os principais modelos foram propostos por Ricou e Spalding, 1961, Long, 1963, Cude, 1974 e Birch, 1984. Ricou propôs uma nova técnica para determinar a taxa mássica axial no jato turbulento formado quando o gás é ejetado para a atmosfera à pressão constante. Long fez estimativas da extensão das áreas de perigo no entorno da liberação de um jato. Cude estudou a dispersão de gases liberados para a atmosfera provenientes de válvula de alívio de pressão e Birch analisou a estrutura e o decaimento da concentração de jatos de alta pressão de gás natural.

Para a análise de riscos industriais, o comportamento de gases inflamáveis, liberados na atmosfera na forma de um jato é de grande interesse visto que um dos mais importantes cenários de acidente em uma instalação onde existam gases inflamáveis é o jato de fogo. Quando a formação do jato ocorre há uma geração de turbulência no entorno da liberação resultando em incorporação de ar pelo jato. Isto faz com que haja redução na concentração do material e, como consequência há aumento do comprimento do jato em relação ao ponto de liberação.

Com base no mencionado acima, é desejável, portanto, poder prever as principais características de um jato (ver figura 4.1), que são:

- Distância ao longo do eixo do jato até o ponto onde a concentração cai abaixo do limite inferior de inflamabilidade (L);
- Diâmetro do jato (D).

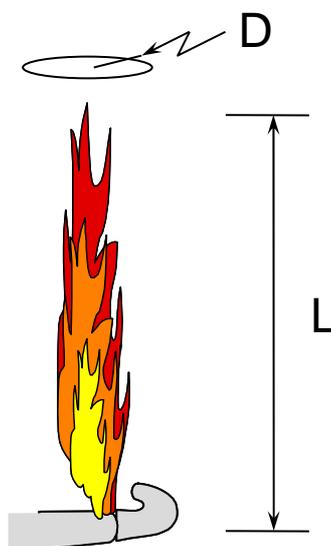


Figura 4-1 - Principais características a serem determinadas em um jato de fogo

A caracterização do jato é necessária para a definição da região com chama e os campos de fluxo térmico quando se tratar de liberação de material inflamável com ignição e formação de jato de fogo.

Os danos causados por este tipo de incêndio variam com o tamanho da chama, o fluxo de calor e a velocidade de queima. Alguns fatores são importantes para definir as características do jato de fogo, entre eles as condições de pressão do combustível, a geometria da do orifício de vazamento e o ambiente para onde o jato será formado.

Mudan, 1988, propõe que as características geométricas de jatos de fogo turbulentos são similares àquelas dos *flares* industriais. De fato, muitas das descrições geométricas dos *flares* estão baseadas em experimentos, em pequena escala, de jatos de fogo.

O critério de seleção dos modelos usados para cálculo, neste trabalho, tanto para jato de fogo como para incêndio em poça se deveu, principalmente, por serem amplamente utilizados em análise de riscos.

#### **4.1.1 Modelos de cálculo de jato de fogo**

Segundo Lees, 1996, em comparação com bolas de fogo e incêndios em poça, o número de cenários de acidente envolvendo jatos de fogo é muito maior. O caso principal tratado é o de chama vertical viajando no sentido da liberação, considerando-se velocidade do vento baixa em relação a velocidade de liberação do material. Contudo, a chama pode não ser vertical, mas sim formar um ângulo e, além disso, deve-se levar em conta a velocidade do vento que modifica a geometria do jato.

Diferentes pesquisadores propuseram diversas geometrias para o jato tais como cônico (p.ex. Craven, 1972), cilíndrico (p. ex. Mudan, 1984) e tronco de cone, em inglês, *frustum* (p. ex. Chamberlain, 1987). Três dos principais modelos foram escolhidos para determinação das características geométricas do jato de fogo neste trabalho: modelo de Clay et alli, modelo de Cook, Bahrami e Whitehouse e modelo de Chamberlain.

##### **4.1.1.1 Descarga de gás**

É importante salientar que antes de iniciar os cálculos usando os modelos de jato de fogo, a taxa mássica de liberação foi determinada com base no modelo de descarga de gases. Este modelo é, normalmente, utilizado para liberações de gases provenientes de vazamentos em vasos, tubulações, válvulas de alívio de pressão ou outro equipamento qualquer, estando fundamentado na equação de Bernoulli.

A maioria das descargas gasosas de vazamentos em plantas de processo é, inicialmente, sônica ou crítica. Um escoamento de um fluido ocorre sempre no sentido das

pressões mais baixas. A informação de que há uma zona de pressão mais baixa é transmitida com a velocidade do som no meio. Quando a velocidade do fluido iguala-se à velocidade local do som (no bocal de saída, p. ex.) não há como transmitir a informação para o fluido a montante que há esta zona de baixa pressão e o escoamento passa a independe da pressão à jusante. O tipo de escoamento é determinado conforme a relação entre as pressões no reservatório e ambiente.

$$r_{\text{crit}} = \left[ \frac{(\gamma + 1)}{2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

$$\frac{P_r}{P_a} > r_{\text{crit}} \rightarrow \text{Escoamento crítico} \quad (2)$$

$$\frac{P_r}{P_a} < r_{\text{crit}} \rightarrow \text{Escoamento subcrítico} \quad (3)$$

onde

$P_r$  = pressão a montante da liberação, [Pa], comumente é a pressão do reservatório;

$P_a$  = pressão atmosférica, [Pa];

$r_{\text{crit}}$  = relação crítica de pressões, [adimensional];

$\gamma$  = razão entre as capacidades caloríficas do gás a pressão e a volume constantes, [adimensional].

A equação para taxa mássica de descarga gasosa para escoamento sônico é definida por:

$$m_g = C_d \cdot \psi \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\gamma \cdot \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \cdot \frac{P_r}{\sqrt{\frac{R_g \cdot T_r}{M_g}}} \quad (4)$$

onde

$C_d$  = coeficiente de descarga, [adimensional], geralmente varia entre 0,9 e 1,0;

$d$  = diâmetro do orifício por onde ocorre a liberação, [m];

$m_g$  = taxa mássica de descarga do gás, [kg.s<sup>-1</sup>];

$M_g$  = massa molecular do gás, [kg.kmol<sup>-1</sup>];

$R_g$  = constante universal dos gases, [J.kmol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>];

$T_r$  = temperatura do reservatório, [K];

$\psi$  = fator de fluxo cujo valor é um (unidade) para escoamento crítico e segue a equação (5) a seguir para escoamento subcrítico

$$\psi = \left( \frac{P_a}{P_r} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{P_a}{P_r} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \cdot \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (5)$$

#### 4.1.1.2 Modelo de Clay et alli

Clay et alli, 1988, descrevem um conjunto de modelos usados pelo HSE<sup>5</sup> para avaliação de riscos e um destes é um modelo para jato de fogo de GLP. O comprimento da chama é dado por

$$L = \frac{(\Delta H_c \cdot m_g)^{0.444}}{161.66} \quad (6)$$

onde

L = comprimento do jato de fogo, [m];

$\Delta H_c$  = calor de combustão do gás, [J.kg<sup>-1</sup>].

#### 4.1.1.3 Modelo de Cook, Bahrami e Whitehouse

Cook, Bahrami e Whitehouse, 1990, descrevem um modelo para jato de fogo incorporado no código computacional SAFETI (*software* usado pela DNV - Det Norsk Veritas para análise quantitativa de riscos). Este modelo presume que o jato é emitido verticalmente ou horizontalmente em relação ao solo. A equação que determina o comprimento do jato de fogo é descrita por:

$$L = 0.00632 \cdot (\Delta H_c \cdot m_g)^{0.478} \quad (7)$$

#### 4.1.1.4 Modelo de Chamberlain

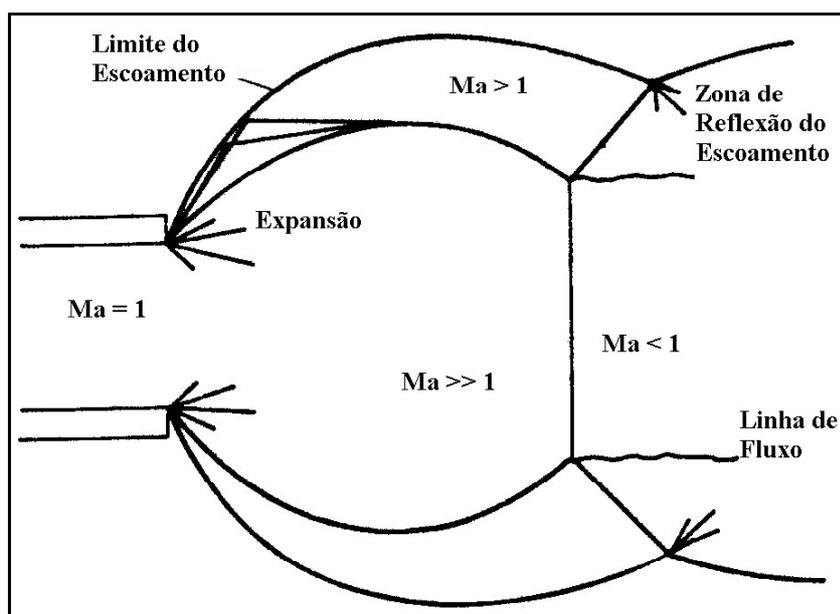
O modelo de Chamberlain, 1987, para chama de *flares* leva em conta os parâmetros geométricos diâmetro efetivo da liberação, comprimento da chama livre no ar, comprimento da chama em condições determinadas e outros não relevantes neste estudo.

Conforme observado por Moodie, 1990, quando a pressão de estagnação for suficientemente alta, a velocidade de saída é sônica e a pressão estática na saída é maior do que a pressão atmosférica. A relação entre a pressão de estagnação e a pressão na saída do bocal é dada por relações de expansão isentrópicas baseadas na equação (1). Ou seja, quando se tem uma razão alta entre a pressão de estagnação e a ambiente, a pressão de saída no bocal é maior que a pressão ambiente e o comportamento do jato pode ser visto na figura 4.2 que ilustra o comportamento do jato na saída de um bocal.

Dito de outra forma, se a pressão no interior do sistema for alta suficiente para que se tenha uma pressão no bocal de saída maior do que  $r_{crit} \cdot P_a$ , haverá uma expansão com geração de velocidades supersônicas, isto é, número de Mach maior que a unidade.

---

<sup>5</sup> Health & Safety Executive – agência responsável pela regulamentação das atividades de risco na Grã-Bretanha.



Fonte: Moodie, 1990

Figura 4-2 – Comportamento do jato gasoso na saída de um bocal

As equações a seguir são utilizadas no modelo de Chamberlain para cálculo do comprimento máximo de jatos de fogo.

$$Ma = 11.61 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{m_g}{P_r \cdot 10^{-3} \cdot d^2} \left( \frac{T_r}{\gamma \cdot M_g} \right)^{0.5} \quad (8)$$

$$d_j = \frac{4 \cdot m_g}{\pi \cdot P_a \cdot Ma} \cdot \left( \frac{R_g \cdot T_r}{\gamma \cdot M_g} \right)^{0.5} \quad (9)$$

$$\rho_j = \rho_g \cdot \frac{273}{T_r} \quad (10)$$

$$D_s = d_j \cdot \left( \frac{\rho_j}{\rho_a} \right)^{0.5} \quad (11)$$

$$W_g = \frac{M_g}{15.816 \cdot M_g + 39.5} \quad (12)$$

$$u_j = \frac{m_g}{\rho_j \cdot \frac{\pi \cdot D_s^2}{4}} \quad (13)$$

$$\left( \frac{2.85 \cdot D_s}{L_o \cdot W_g} \right)^{\frac{2}{3}} - 0.2 - 0.024 \cdot \left( \frac{g}{D_s^2 \cdot u_j^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot L_o = 0 \quad (14)$$

$$L(\theta) = L_o \cdot (0.51 \cdot e^{-0.4 \cdot u_v} + 0.49) \cdot [1 - 0.00607 \cdot (\theta - 90)] \quad (15)$$

onde

$D_s$  = diâmetro efetivo da fonte, [m];

$d_j$  = diâmetro virtual da fonte, [m];

$L_o$  = comprimento do jato de fogo na direção vertical, [m];

$Ma$  = número de Mach, [adimensional];

$u_j$  = velocidade do gás na saída do bocal, [ $m.s^{-1}$ ];

$u_v$  = velocidade do vento medida na cota de 10 m, [ $m.s^{-1}$ ];

$W_g$  = fração mássica do gás na mistura estequiométrica com o ar, [adimensional];

$\theta$  = ângulo de interesse que o jato forma com o solo, [graus];

$\rho_j$  = massa específica do gás na saída do bocal, [ $kg.m^{-3}$ ];

$\rho_g$  = massa específica do gás a montante do bocal, [ $kg.m^{-3}$ ].

#### 4.1.2 Resultados dos cenários de acidentes do tipo jato de fogo

Nesta seção, serão apresentados os resultados para o comprimento do jato de fogo para os 5 cenários de acidente analisados na forma de tabela e de figuras contendo a projeção das áreas vulneráveis na planta baixa da unidade.

A tabela 4.1 apresenta os resultados dos comprimentos de jato, as quais, por sua vez determinam as áreas que poderiam vir a serem atingidas em cada um dos três casos avaliados em cada cenário de acidente. Na tabela, “A” representa a simulação considerando vazamento por ruptura de 10% do diâmetro nominal da linha e “B” representa ruptura de 100% do diâmetro. As simulações realizadas para o cálculo do comprimento do jato de fogo e, conseqüente das áreas vulneráveis foram realizados no *software* MathCad 11.0 fazendo-se o uso dos modelos já mencionados.

Tabela 4-1 – Resultados para comprimento de jato de fogo

Cenário	Diâmetro do orifício [in]	Vazão mássica de gás [ $kg.s^{-1}$ ]	Comprimento do jato [m]		
			Modelo de Clay	Modelo de Cook, Bahrami e Whitehouse	Modelo de Chamberlain
1A	1	1,58	19,3	18,7	19,3
1B	10	13,10	48,9	51,3	51,1
2A	0,4	0,16	7,2	6,5	4,2
2B	4	13,24	51,1	53,7	48,3
3A	1	1,31	17,6	17,1	16,7
3B	10	4,97	31,8	32,3	27,6
5A	0,6	0,36	10,3	9,6	8,3
5B	6	11,84	48,6	50,8	49,9

Cenário	Diâmetro do orifício [in]	Vazão mássica de gás [kg.s <sup>-1</sup> ]	Comprimento do jato [m]		
			Modelo de Clay	Modelo de Cook, Bahrami e Whitehouse	Modelo de Chamberlain
6A	0,4	0,22	7,9	7,2	4,5
6B	4	5,26	32,6	33,2	31,3

Com base nos resultados apresentados na tabela 4.1, pode-se concluir que os valores obtidos para comprimento do jato de fogo para os três modelos usados no cálculo foram bastante semelhantes. Esta semelhança é maior entre os modelos de Clay e de Cook, Bahrami e Whitehouse, pois estes modelos levam em consideração, basicamente, os mesmos parâmetros como o calor de combustão e a vazão mássica do gás. Já o modelo de Chamberlain, é mais completo e leva em consideração parâmetros ambientais como velocidade do vento e parâmetros físicos como velocidade do gás na saída do bocal, expansão do gás, além de outros fatores.

De modo a ser conservador na proteção térmica das estruturas e sistema elétrico da unidade de craqueamento catalítico nas regiões de influência de acidentes com conseqüente formação de jato de fogo, foram utilizados os maiores valores de comprimento de jato para cada cenário de acidente, assinaladas em letra itálica vermelha na tabela 4.1. Esta hipótese torna-se bastante razoável do ponto de vista de se obter uma maior segurança da unidade nos cenários de acidente que envolva incêndios. Uma outra consideração que deve ser mencionada é que o comprimento de jato foi considerado como sendo livre de quaisquer obstáculos, ou seja, é como se o equipamento estivesse sozinho na área.

Nas figuras que serão apresentadas nesta seção, as áreas hachuradas representam os limites das áreas que poderiam vir a serem atingidas em cada um dos dois casos avaliados em cada cenário de acidente (em vermelho – caso A e em azul – caso B). Deve ser ressaltado que em caso de ocorrência de acidente, apenas uma parte da área da região hachurada, aquela definida pelo contorno da curva correspondente à concentração equivalente ao limite inferior de inflamabilidade situada na direção do jato no momento do acidente é que efetivamente seria atingida, isto pode ser visto na figura 4.2, representada pela região hachurada de cor preta.

Dado que o jato pode estar direcionado em qualquer direção, esta distância é então usada a partir da tubulação para delimitar a região potencialmente sujeita às conseqüências do efeito. Outra consideração importante é que como as linhas analisadas neste trabalho são aéreas, portanto, a região potencialmente sujeita a jatos de fogo é um sólido de revolução no entorno do ponto de liberação com as dimensões determinadas pelo comprimento do jato. As figuras que seguem apresentam as áreas potencialmente atingidas para cada cenário de acidente envolvendo jato de fogo analisado.

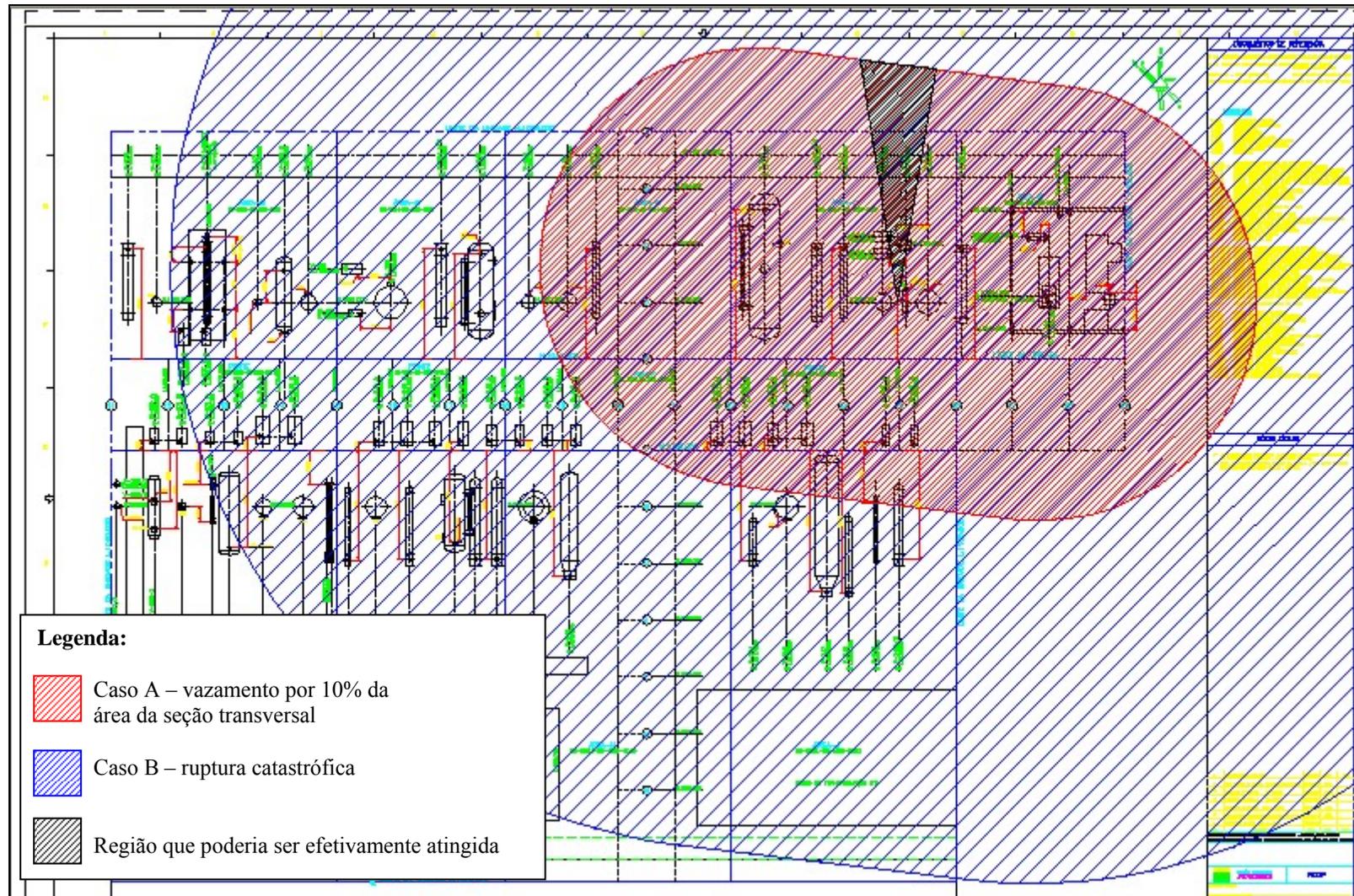


Figura 4-3 – Área vulnerável a jato de fogo para cenário de acidente 01

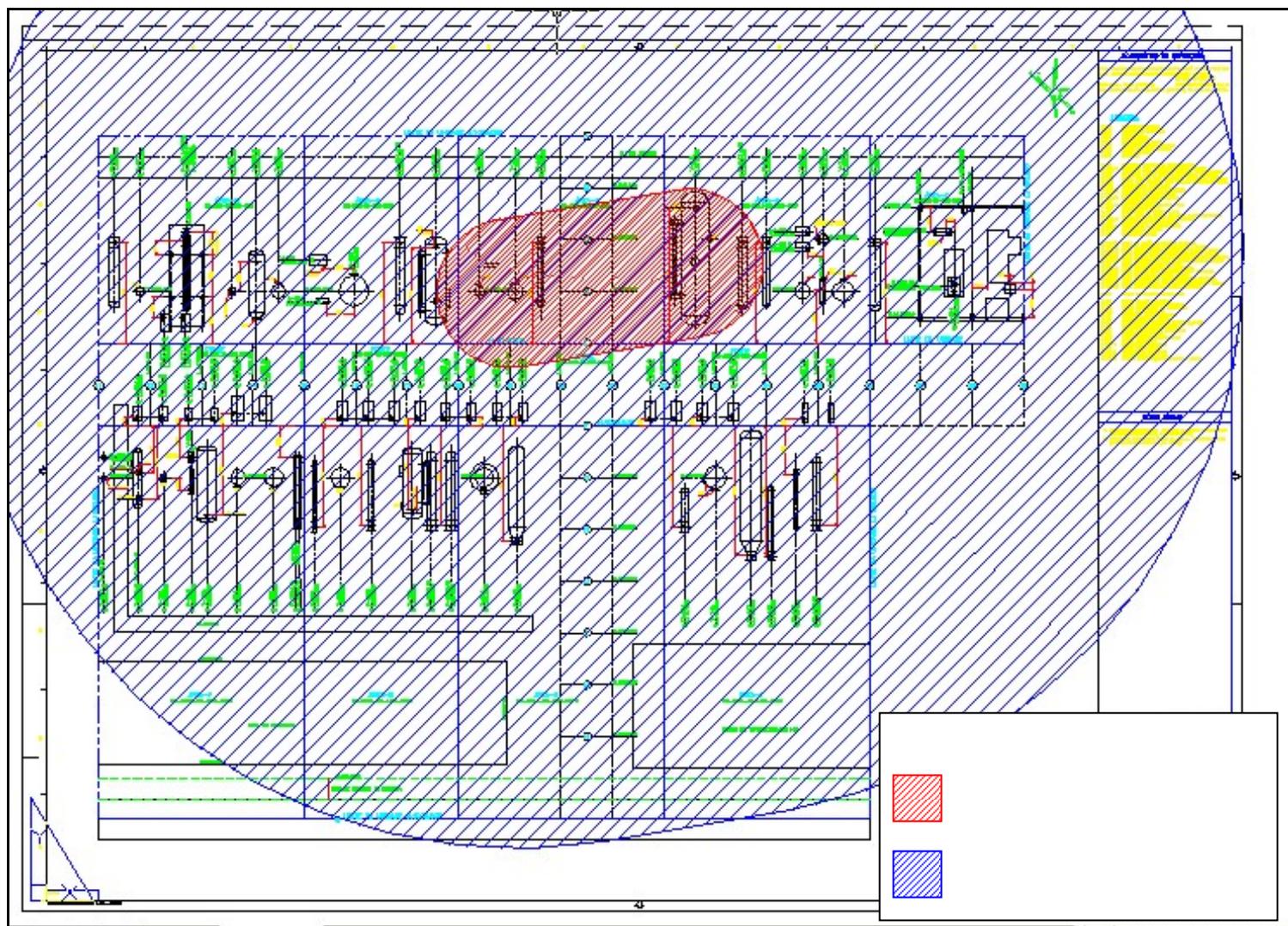


Figura 4-4 – Área vulnerável a jato de fogo para cenário de acidente 02

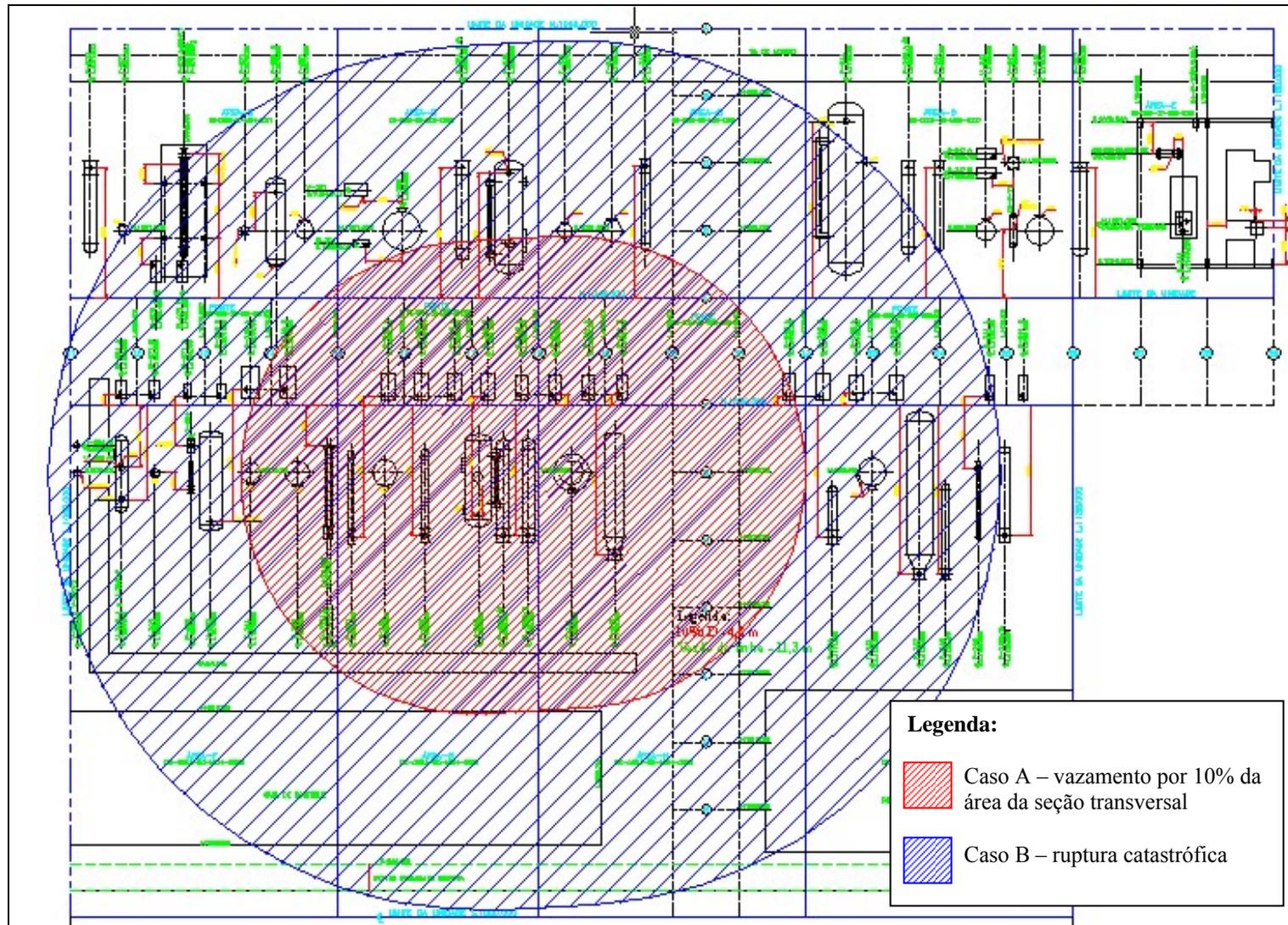


Figura 4-5 – Área vulnerável a jato de fogo para cenário de acidente 03

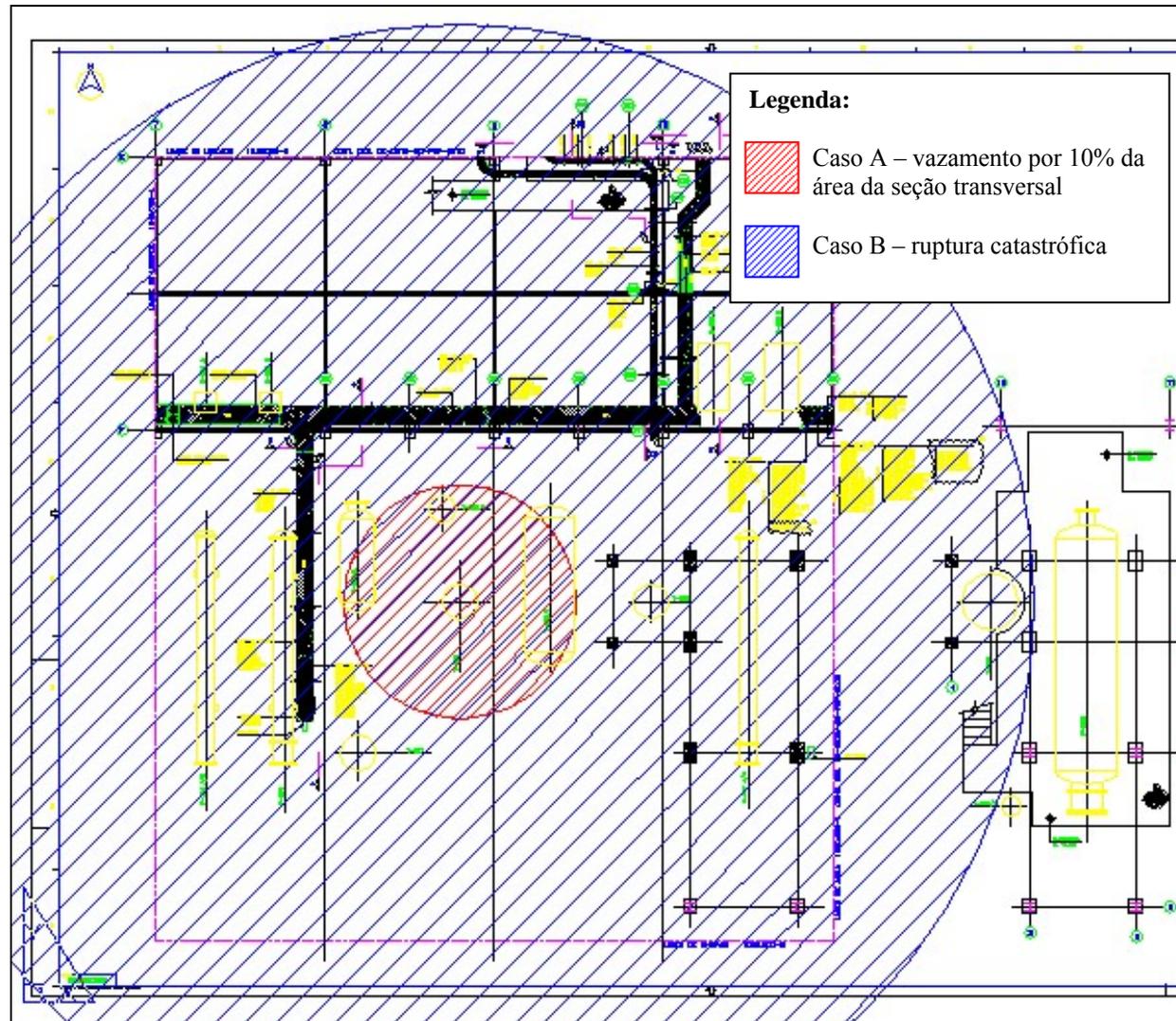


Figura 4-6 – Área vulnerável a jato de fogo para cenário de acidente 05

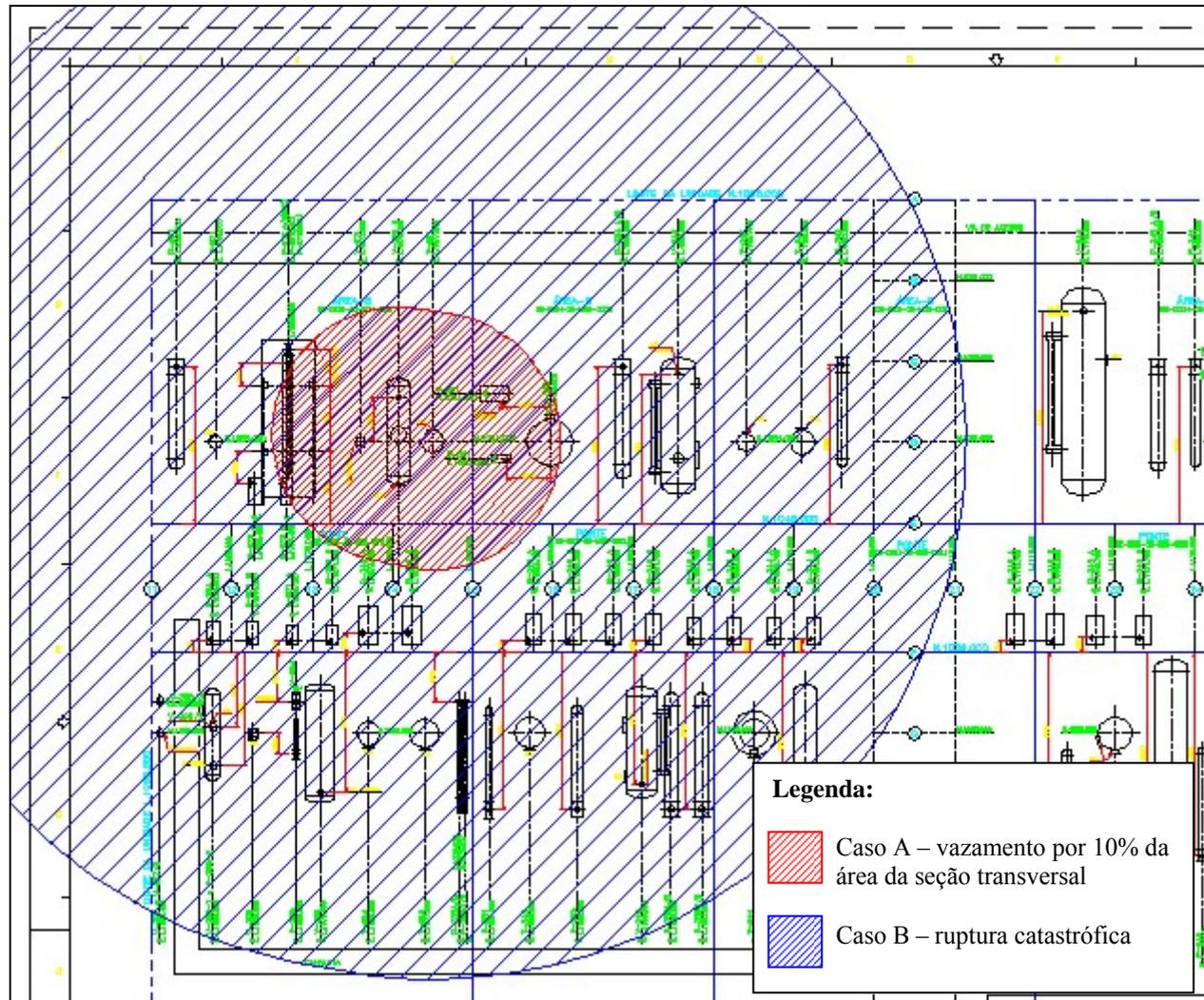


Figura 4-7 – Área vulnerável a jato de fogo para cenário de acidente 06

## 4.2 Incêndio em poça

O incêndio em poça tende a ter seus efeitos localizados, porém possui potencial de ser agente causador de outros incêndios em locais próximos devido tanto à radiação térmica quanto por contato direto com a chama. Este incêndio ocorre quando de uma liberação de um líquido inflamável seguido de ignição da poça formada. Resumidamente, os fatores que são necessários para que este incêndio ocorra são: derrame acidental de um líquido inflamável, espalhamento da poça e ignição. Na literatura, têm-se modelos matemáticos que permitem estimativas das principais características de incêndios em poça.

Se o material estiver estocado numa temperatura superior ao seu ponto de ebulição, no momento de uma liberação uma parte do material irá subitamente passar para a fase vapor e uma parte formará a poça. Assim que formada a poça, o processo de evaporação (ou a evaporação súbita no caso de gases liquefeitos) pode gerar uma nuvem de gás que ao sofrer ignição pode levar a chama e iniciar o incêndio em poça.

Uma vez iniciada a ignição, o incêndio em poça acontece e o fator predominante para os danos é devido aos efeitos térmicos, principalmente da taxa de transferência de calor por radiação resultante da chama, quando o ponto de interesse não estiver dentro da própria região da chama. A determinação dos efeitos térmicos depende do tipo de combustível, da geometria da poça, da duração do fogo, da localização e posicionamento do corpo receptor da radiação térmica da chama, bem como do comportamento térmico do receptor.

Existe na literatura uma quantidade considerável de estudos relacionados com incêndio em poça relatando o comportamento do próprio incêndio em poça, o processo de combustão e o calor de radiação da chama. Estudos foram feitos para determinar a taxa de queima de líquidos inflamáveis, a transferência de calor da superfície do líquido e a fração desta energia que é irradiada. Exemplos podem ser encontrados em Rasbach, Rogowski e Stark, 1956, e Blinov e Khudiakov, 1957.

O trabalho de Blinov e Khudiakov foi conduzido para uma grande variedade de diâmetros de poça. Hottel, 1959, analisou os dados fornecidos por Blinov e Khudiakov e mostrou que, quando o diâmetro da poça é aumentado, há uma progressão do regime de queima de laminar para turbulento.

Muitos testes envolvendo incêndio em poça de gás natural foram realizados pela *American Gas Association* – AGA desenvolvidos por Brown, Wesson e Welker, 1975, que relacionaram a taxa de queima do líquido com o calor irradiado. Outros testes com incêndio em poça de gás natural e propano foram realizados pela Shell Co onde Blackmore, Eyre e Summers, 1982, estudaram os fenômenos envolvendo este tipo de acidente.

### 4.2.1 Modelos de cálculo de incêndio em poça

Um incêndio em poça é um fenômeno complicado e o tratamento teórico é bastante complexo. Desta forma, é apropriado descrever algumas características empíricas relevantes no cálculo de incêndio em poça.

A queima num incêndio em poça é realizada através de uma chama geralmente considerada de forma cilíndrica com altura ( $H$ ) aproximada de duas vezes o seu diâmetro ( $D$ ). Considera-se chama vertical nos casos em que a presença da ação do vento não é significativa, porém, deve-se ter em conta que a velocidade do vento influi diretamente no direcionamento da chama. A figura 4.8 a seguir ilustra a consideração de chama cilíndrica mencionada acima.

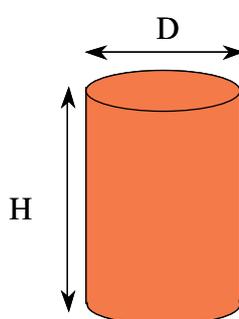


Figura 4-8 – Chama cilíndrica em um incêndio em poça

É importante mencionar também que, as características do incêndio em poça dependem diretamente do diâmetro da poça, pois a taxa de queima do líquido aumenta com o diâmetro até que para poças muito grandes um valor fixo é alcançado. Da mesma forma, o calor de radiação térmica da chama comporta-se similarmente, ou seja, a radiação térmica aumenta com o diâmetro até que estabiliza em um valor para poças suficientemente grandes.

Muitos combustíveis como gás natural, queimam com uma chama relativamente limpa, enquanto outros, como querosene e GLP, produzem chama envoltas em fumaça. A quantidade de fumaça afeta a transferência de calor por radiação. Segundo Lees, 1996, a fração da energia liberada pela combustão na forma de radiação térmica em um incêndio em poça é usualmente considerada entre 0,2 e 0,4.

#### 4.2.1.1 Descarga de líquido

Antes de iniciar os cálculos para o dimensionamento do incêndio em poça, a taxa mássica de liberação foi determinada com base no modelo de descarga de líquido. Para descargas de líquidos, a força que impulsiona o escoamento decorre da diferença de pressão com conversão em energia cinética durante a descarga. Desde que se considere que a massa específica

permaneça constante durante a descarga, o balanço de energia pode ser dado pela equação de Bernoulli

$$\frac{P_a - P_r}{\rho_l} + g \cdot (h_1 - h_{10}) + \frac{1}{2} \cdot (v_s^2 - v_r^2) = 0 \quad (16)$$

onde

$g$  = aceleração da gravidade, [ $m \cdot s^{-2}$ ];

$h_1$  = altura de líquido no reservatório, [m];

$h_{10}$  = altura inicial do líquido no reservatório, [m];

$v_r$  = velocidade do líquido no reservatório em [ $m \cdot s^{-1}$ ], comumente considera-se esta velocidade nula;

$v_s$  = velocidade do líquido na saída do orifício em [ $m \cdot s^{-1}$ ];

$\rho_l$  = massa específica do fluido em [ $kg \cdot m^{-3}$ ].

Aplicando as considerações mencionadas anteriormente pode-se deduzir que a velocidade do líquido no ponto de saída equivale a:

$$v_s = \sqrt{2 \cdot \frac{(P_r - P_a)}{\rho_l} + 2 \cdot g \cdot (h_1 - h_0)} \quad (17)$$

onde

$h_0$  = altura do orifício, [m].

Para um perfil de velocidade uniforme na seção transversal, a taxa mássica de descarga pode ser determinada por

$$m_l = A \cdot \rho_l \cdot v_s \quad (18)$$

onde

$A$  = área da seção transversal do orifício, [ $m^2$ ].

$m_l$  = taxa mássica de descarga do líquido, [ $kg \cdot s^{-1}$ ].

Assim, a equação amplamente utilizada para o cálculo de taxa de descarga de líquido toma a forma mostrada na equação (19), onde se acrescenta um coeficiente de descarga,  $C_d$  ver Crowl e Louvar, 1990, para levar em conta a “vena contracta” e a não uniformidade do perfil de velocidades no orifício de saída segundo Bird, 1978. Em geral, para líquidos escoando por orifício com bordas vivas, usa-se  $C_d$  entre 0,60 e 0,65.

$$m_l = C_d \cdot A \cdot \rho_l \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{(P_r - P_a)}{\rho_l} + 2 \cdot g \cdot (h_1 - h_0)} \quad (19)$$

Depois de determinada a taxa mássica de descarga do líquido através do orifício, pode-se calcular as características do incêndio em poça que serão apresentadas a seguir.

#### 4.2.1.2 Taxa mássica de queima por unidade de área

Hottel, 1959, estudou o comportamento da variação da velocidade de queima líquida em função do diâmetro da poça para regimes de queima laminar e turbulento. Os dados observados estão reproduzidos na figura 4.9.

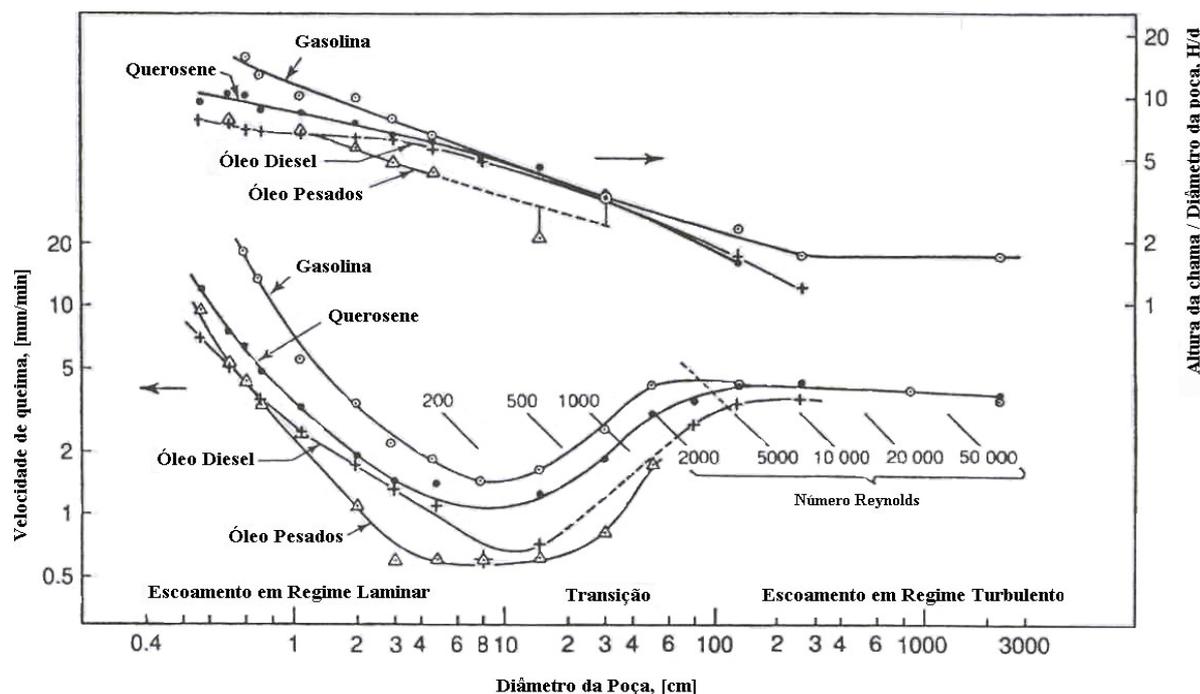


Figura 4-9 – Relação entre velocidade de queima e diâmetro da poça para diversos hidrocarbonetos – Fonte: Lees, 1996

A curva superior apresenta a razão entre a altura e diâmetro da chama como função do diâmetro da poça. A linha diagonal que interceptam as curvas inferiores representam linhas onde o número de Reynolds é constante, baseados no diâmetro da poça.

É interessante mencionar que a relação entre velocidade de queima e diâmetro da poça tem a mesma estrutura para os hidrocarbonetos estudados. Primeiro ocorre um decréscimo da velocidade de queima com o diâmetro da poça quando regime de queima é laminar, com número de Reynolds menor que 20. Para número de Reynolds entre 20 e 200, a velocidade de queima aumenta com o diâmetro e, para número de Reynolds acima deste valor, a relação permanece praticamente constante sendo caracterizada por regime de queima turbulento. Hottel ainda demonstrou que o comportamento acima pode estar relacionado com a taxa de transferência de calor na qual determina a taxa de evaporação do líquido.

Burgess et al., 1961, mostrou que a velocidade na qual a poça, com diâmetro maior que um metro, diminui é dada por

$$\dot{y}_{\max} = 1,27 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\Delta H_c}{\Delta H^*} \quad (20)$$

onde

$\dot{y}_{\max}$  = velocidade de diminuição da poça, [m.s<sup>-1</sup>];

$\Delta H^*$  = calor de vaporização modificado, [J.kg<sup>-1</sup>].

O calor de vaporização modificado é a soma do calor de vaporização com um ajuste dado pelo aquecimento do líquido desde a temperatura ambiente até a temperatura de ebulição do líquido dado pela equação abaixo

$$\Delta H^* = \Delta H_v + \int_{T_a}^{T_{BP}} C_p \cdot dT \quad (21)$$

onde

$C_p$  = capacidade calorífica do líquido a pressão constante, [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>];

$T_a$  = temperatura ambiente, [K];

$T_{BP}$  = temperatura de ebulição, [K];

$\Delta H_v$  = calor de vaporização do líquido na temperatura ambiente, [J.kg<sup>-1</sup>].

Esta equação pode ser modificada para o caso de misturas de líquidos conforme Mudan e Croce, 1988.

Com base nisto, pode-se determinar a taxa mássica de queima do fluido multiplicando-se a velocidade de queima pela massa específica do fluido conforme

$$m_b = \rho_l \cdot \dot{y}_{\max} \quad (22)$$

onde

$m_b$  = taxa de queima por unidade de área da poça, [kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>].

#### 4.2.1.3 Diâmetro máximo da poça

Segundo Mudan e Croce, 1988, o número de cenários de acidente envolvendo hidrocarbonetos é bastante numeroso. Estes vazamentos podem ser classificados com base na localização onde ocorre este derramamento, por exemplo, tanques de armazenamento, no processamento ou durante as operações de transferência. O tipo de solo onde se deposita o líquido derramado também é importante, ou seja, se é na água, em concreto, na terra, etc. A classificação baseada na taxa de liberação e na duração é apresentada abaixo:

- Liberação instantânea: todo o líquido é vazado durante um curto espaço de tempo;
- Liberação contínua: o derramamento é contínuo com uma taxa definida de liberação durante um longo período de tempo;
- Liberação intermitente: quando um dado volume de líquido é liberado num dado período de tempo, sendo que esta taxa de liberação finita, pode variar com o tempo.

A distinção entre curto e longo período de tempo depende de alguns fatores como o tamanho da poça formada, das propriedades do líquido e do ambiente. Quando a poça líquida formada entra em ignição, o incêndio em poça se desenvolve e, desta forma, o diâmetro que envolve o incêndio em poça dependerá do modo em que se processou a liberação, de sua taxa de liberação e da taxa de queima.

Para grandes taxas de queima, a transferência de calor por radiação é dominante e depende essencialmente das propriedades termoquímicas do combustível. No caso de liberações contínuas, o líquido irá se espalhar e aumentar a taxa de queima até uma taxa de queima total máxima que é igual a taxa de liberação do líquido. A equação a seguir pode ser usada para estimar o diâmetro máximo que a poça pode atingir

$$D_{\max} = 2 \cdot \sqrt{\frac{m_l}{\pi \cdot m_b}} \quad (23)$$

onde

$D_{\max}$  = diâmetro máximo que a poça pode alcançar, [m].

Porém, há casos em que a poça que se forma pode estar confinada a um espaço específico como no caso deste trabalho. Nestes casos, a equação (23) não é empregada e a área potencialmente sujeita a formação de uma poça de líquido que eventualmente poderia entrar em ignição é definida pela contenção que envolve a instalação. No local deste cenário de acidente, a área de confinamento pode ser visualizada na figura 3.4 apresentada no capítulo anterior. A área estimada, através de levantamento no próprio local do acidente, que poderia conter a poça é de, aproximadamente, 28 m<sup>2</sup>, ou seja, um diâmetro equivalente máximo de poça circular de 6 metros. O raio da poça aumenta ao longo do tempo até atingir o diâmetro máximo e, após vai diminuindo até que o combustível seja consumido pelo fogo.

#### 4.2.1.4 Altura da chama

Thomas, 1963, apresenta uma correlação para determinar a altura de uma chama turbulenta, desconsiderando ação do vento, baseada em dados experimentais em escala laboratorial, para uma poça circular, dada por

$$H = 42 \cdot D_{pc} \cdot \left( \frac{m_b}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D_{pc}}} \right)^{0,61} \quad (24)$$

onde

$D_{pc}$  = diâmetro equivalente a poça circular, [m];

$H$  = altura da chama, [m];

$\rho_a$  = massa específica do ar, [kg.m<sup>-3</sup>].

A presença do vento pode alterar o comprimento de chamas. Desta forma, Thomas, 1963, propôs uma correlação que levasse em consideração a velocidade do vento,

$$H = 55 \cdot D_{pc} \cdot \left( \frac{m_b}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D_{pc}}} \right)^{0,67} \cdot (v^*)^{-0,21} \quad (25)$$

onde

$v^*$  = velocidade do vento adimensionalizada, [adimensional].

Esta velocidade do vento adimensional é dada por

$$v^* = \frac{u_v}{\left( \frac{g \cdot m_b \cdot D_{pc}}{\rho_a} \right)^{1/3}} \quad (26)$$

#### 4.2.1.5 Inclinação da chama

Há pelo menos três correlações que relacionam o ângulo de inclinação da chama em relação ao eixo vertical na literatura. A correlação dada por Welker e Sliepcevich, 1967, é apropriada para pequenos diâmetros de poça contendo líquidos combustíveis. Thomas, 1963, propôs uma correlação baseada em dados experimentais conforme segue:

$$\cos \beta = 0,7 \cdot \left( \frac{u_v}{\left( \frac{g \cdot m_b \cdot D_{pc}}{\rho_a} \right)^{1/3}} \right)^{-0,49} \quad (27)$$

onde

$\beta$  = o ângulo de inclinação da chama de um incêndio em poça devido a ação do vento, [graus].

Para o caso deste estudo, a velocidade média do vento considerada é de  $2,3 \text{ m.s}^{-1}$  na cota de 10 metros na região onde se localiza a unidade de processo em estudo neste trabalho, referente ao período compreendido entre julho de 1994 e junho de 1995 obtidos junto ao INEMET (8° DISME). A figura 4.10 a seguir apresenta as principais características a serem determinadas em um incêndio em poça onde  $h$  é a altura da chama e os parâmetros A e B são as dimensões da chama.

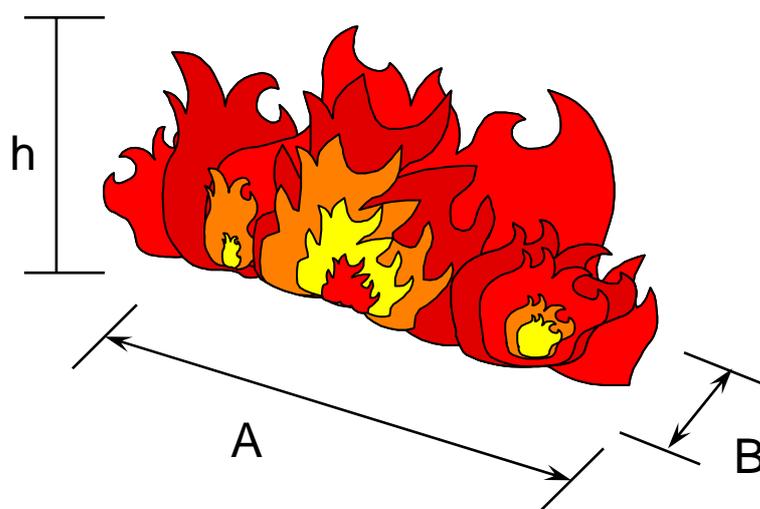


Figura 4-10 - Principais características a serem determinadas em um incêndio em poça

#### 4.2.2 Resultados do cenário de acidente do tipo incêndio em poça

Os resultados para o diâmetro equivalente de poça circular, altura e inclinação da chama durante um incêndio em poça para o cenário de acidente analisado serão apresentados nesta seção. Cabe lembrar que as áreas vulneráveis apresentadas nas figuras desta seção sob a forma de retângulos representam os limites das áreas que poderiam vir a ser atingidas. As simulações realizadas para o cálculo das áreas vulneráveis foram realizadas no *software* MathCad 11.0 fazendo-se o uso das equações já mencionadas.

Dado que o vento pode, em princípio, estar soprando em qualquer direção, a inclinação da chama no incêndio em poça seria determinada pela direção do vento na hora do acidente.

A tabela 4.2 a seguir apresenta estes resultados onde letra “A” representa a simulação considerando vazamento por ruptura de 10% do diâmetro nominal da linha e “B” representa ruptura de 100% do diâmetro.

Tabela 4-2 - Resultados para cenário de acidente de incêndio em poça

Cenário	Vazão mássica da descarga [kg/s]	Altura da chama [m] Sem ação do vento	Altura da chama [m] Com ação do vento	Inclinação da chama [graus]
4A	2,44	16,2	15,56	52,2
4B	1208,30	18,58	17,98	51,1

*Nota: para o cenário 4B, a vazão mássica de descarga do líquido foi considerada como sendo a vazão na linha*

Observa-se que para cenário de acidente com incêndio em poça, a dimensão mais importante é a altura de, aproximadamente, 2,5 metros em que estão os cabos elétricos em relação ao chão. Ou seja, em caso de acidente, pode-se concluir que os cabos elétricos ficarão totalmente imersos no fogo. Esta afirmativa pode ser confirmada através da figura 3.4 apresentada anteriormente.

Para o cenário 4A, o diâmetro alcançado pela poça é de 4,9 metros, ou seja, o raio da poça aumenta ao longo do tempo até atingir o diâmetro máximo, que neste caso é quando o combustível é consumido pelo fogo. Desta forma, o diâmetro máximo estabelecido de 6 m não será alcançado. Para o cenário 4B, o diâmetro máximo a ser alcançado caso a poça pudesse se formar livremente seria de 109,5 m. Mas como para este cenário de acidente, a área disponível para formar a poça corresponde a uma poça circular de diâmetro 6 m, fixou-se este valor para o cálculo da altura da chama. Também para o cenário 4B, a vazão mássica de descarga do líquido foi considerada como sendo a vazão na linha.

A figura 4.11 que segue apresenta a área potencialmente atingida para o cenário de acidente envolvendo incêndio em poça onde a região hachurada representa o limite da área que poderia vir a ser atingida (em vermelho – caso A e em azul – caso B). É importante lembrar que esta figura representa uma vista superior do incêndio em poça e que a forma retangular é apenas um modelo utilizado para o cálculo da altura da chama. Ou seja, na realidade a poça formada tomará a forma dos contornos dos equipamentos no seu entorno. Para fins de representação da área sujeita a incêndio em poça, tomou-se a forma retangular.

Os campos de fluxos térmicos poderiam ser determinados usando modelos apropriados existentes na literatura, mas pelo que se tem de resultados para os eventos de jato de fogo, praticamente toda a área da unidade estaria sujeita à chama direta. Portanto, somente usou-se a altura das chamas para avaliar os danos devido ao evento de incêndio em poça.

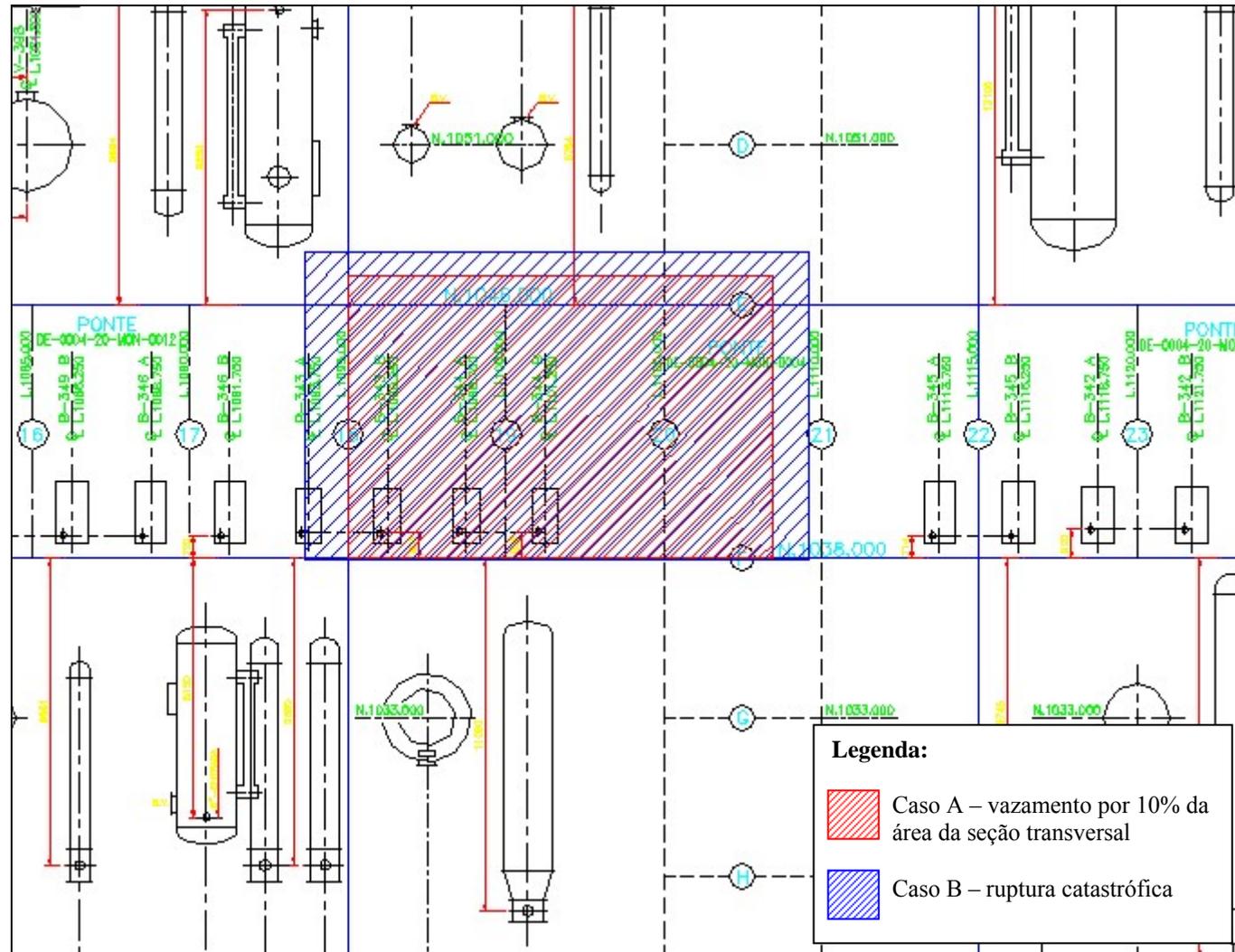


Figura 4-11 – Área vulnerável a jato de fogo para cenário de acidente 04

### 4.3 Resumo

Neste capítulo, foram apresentados os modelos utilizados para delimitação das áreas vulneráveis através do cálculo de comprimento de jatos de fogo e altura da chama em um incêndio em poça. Estes modelos foram selecionados entre àqueles que apresentam resultados satisfatórios e que são comumente empregados para cálculo de efeitos físicos para acidentes relacionados a estes eventos em trabalhos de análise de riscos. Os principais resultados obtidos para os cenários de acidente considerados nesta análise estão apresentados na forma de tabelas e também na forma gráfica. Sendo que o principal cenário de acidente, ou seja, aquele que leva a uma região maior de risco é o cenário 01.

É importante mencionar que as áreas determinadas a partir deste estudo seriam abrangidas por fogo direto, pois como se pode perceber pelas figuras praticamente toda a unidade é coberta por estas áreas. Portanto, não foi incluída neste trabalho a avaliação dos fluxos térmicos gerados pelo jato de fogo ou pelo incêndio em poça.

## **5 EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE ESTRUTURAS E SISTEMAS ELÉTRICOS**

Neste capítulo, serão discutidos os efeitos da temperatura sobre estruturas de aço e sistemas elétricos. Isto porque a elevação da temperatura do aço provoca alterações em suas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, há possibilidade de efeitos danosos a estruturas confeccionadas com este material. Nos sistemas elétricos, o principal dano envolve a impossibilidade de execução dos procedimentos de parada da unidade de forma segura em caso de uma emergência envolvendo fogo na unidade. Ou seja, em caso de falha no sistema elétrico, a comunicação entre a área e o painel de controle será interrompido.

### **5.1 Modificação das propriedades do aço**

Algumas propriedades do aço são de interesse em diversos estudos como, por exemplo, o módulo de elasticidade, o coeficiente de expansão térmica, a massa específica, o calor específico e a condutividade térmica entre outros. Com exceção da massa específica, todas as outras propriedades são fortemente influenciadas pela temperatura. O efeito da temperatura nas propriedades do aço tem sido constantemente estudado por diversos autores.

Segundo Silva, 1986, a ação térmica nos elementos metálicos, em conseqüência do aumento da temperatura, provoca redução na resistência mecânica, na rigidez e também faz com que ocorra o aparecimento de esforços solicitantes adicionais. O aumento de temperatura resulta da incorporação de calor devido a fluxos de calor por radiação e/ou convecção provocada pela diferença de temperatura entre os gases quentes do ambiente em chamas e os componentes da estrutura.

As estruturas metálicas, de forma genérica, devem ser protegidas em caso de incêndio, pois os elementos estruturais de aço perdem cerca de 50% de sua resistência mecânica quando aquecidos a uma temperatura, chamada de temperatura crítica, de cerca de 550°C. Este valor de temperatura crítica, pode sofrer variações dependendo da quantidade de cromo presente no aço, tamanho dos grãos, espessura da peça, nível de tensões e, principalmente pela existência de irregularidades geométricas na peça inclusive causadas por defeitos internos no material ou por defeitos de solda.

Isto acontece porque o aumento da temperatura faz diminuir o limite de resistência, o limite de escoamento e o módulo de elasticidade dos metais. A elevação da temperatura causa também um aumento na ductilidade dos metais, o que é uma conseqüência da redução da resistência mecânica. Para alguns metais, como é o caso do aço-carbono, um aumento moderado da temperatura, inicialmente provoca um aumento também moderado no limite de resistência. Isto acontece até um certo ponto máximo de onde começa, em seguida, um decréscimo rápido.

A mudança das propriedades dos materiais que ocorre em altas temperaturas se dá devido a modificações na estrutura cristalina do aço, por exemplo, para os aços-carbonos, tipicamente usados em construções, as mudanças significativas não ocorrem para temperaturas abaixo do intervalo de 600 a 650°C. É provável que a falha ocorra antes que a estrutura cristalina se altere significativamente, se o elemento estiver pressionado em um nível próximo ao máximo permitido. Desta forma, a mudança na estrutura cristalina do aço não é considerada, tipicamente, como um fator determinante.

Outros fatores também podem contribuir para a diminuição da resistência do metal, tais como modificações na estrutura metalúrgica, transformações químicas, redução da resistência à corrosão, etc. Devido a estes fatores, o simples fato de um determinado metal ter boa resistência mecânica com a temperatura elevada não significa necessariamente que possa ser utilizado na prática em tal temperatura. Isto porque as propriedades em temperaturas elevadas dependem também fundamentalmente dos tratamentos térmicos e dos processos de fabricação e de acabamento do produto metálico. Vê-se assim que os sistemas de proteção passiva devem ser projetados para impedir ou prolongar o tempo necessário para que o suporte de sustentação de equipamentos ou estruturas de aço atinjam valores altos de temperatura.

## **5.2 Efeitos estruturais**

Os efeitos estruturais, bem como o comportamento de estruturas de aço quando submetidas a incêndio têm sido objeto de estudos realizados por diversos pesquisadores. Um dos fenômenos mais relevantes na avaliação de estruturas de aço em situação de incêndio é a fluência.

A fluência, segundo Silva, 1986, é um fenômeno de deformação permanente, lenta e progressiva, que se observa em metais e ligas metálicas, com o decorrer do tempo, quando submetidos a um esforço de tração em temperatura elevada. A faixa de temperatura acima da qual o fenômeno da fluência passa a ser significativo, denomina-se “faixa de fluência”. A temperatura em que se inicia a faixa de fluência é variável de um metal para outro, sendo em geral relativamente elevada. Por exemplo, para aços inoxidáveis austeníticos é em torno de 540°C. Como as deformações por fluência vão sempre aumentando, terminarão necessariamente pela ruptura do material ao fim de um determinado tempo. Este tempo até a ruptura será tanto menor quanto mais alta for a temperatura ou a tensão inicial.

Devido ao fenômeno da fluência, os aços tornam-se viscosos em temperaturas acima de 30% da temperatura de fusão. Para o aço ASTM A36, a taxa de aumento de fluência aumenta em, aproximadamente, 300 vezes ao se aumentar a temperatura de 454,4 para 510°C. Sabe-se que a fluência é um fenômeno muito complexo que depende do nível de pressão e da taxa de

aquecimento, além de outros fatores, freqüentemente não é considerada em cálculos de resistência ao fogo.

### **5.3 Efeitos sobre os sistemas elétricos**

Sistemas elétricos devem também ser protegidos contra incêndio, pois caso sejam atingidos haveria comprometimento da segurança da instalação visto que a unidade poderia ficar sem energia para executar os procedimentos de parada durante uma situação de emergência. Além disso, incêndios em cabos e fiações elétricas podem propagar o incêndio para outras partes da instalação bem como liberar produtos tóxicos resultantes da queima da cobertura (isolamento) destes trazendo um grande risco para as pessoas e às instalações. A fumaça tóxica e gases quentes que acompanham a queima do material isolante resultam da presença de compostos clorados ou contendo outros elementos que geram por decomposição térmica gases tóxicos e irritantes, sendo que alguns deles quando condensados apresentam uma alta corrosividade pela presença de ácido clorídrico. Portanto, vê-se que um equipamento ou sistema elétrico quando atingido por fluxos térmicos suficientemente altos ou chama direta, poderão sofrer danos com conseqüente comprometimento à segurança da unidade.

### **5.4 Resumo**

Foram apresentados, neste capítulo, os efeitos da temperatura sobre estruturas de aço e sistemas elétricos de modo a avaliar quais os possíveis danos em caso de acidentes envolvendo fogo na unidade. O principal efeito que a elevação da temperatura no ambiente provoca em estruturas de aço é a perda da resistência mecânica podendo levar ao colapso a sustentação de equipamentos, tubulações, etc. No caso de sistemas elétricos, os prejuízos são também graves, pois em caso de dano haverá a impossibilidade de realização dos procedimentos de parada da unidade de forma segura, pois as ações que seriam tomadas imediatamente pelos operadores na sala de controle seriam inviabilizadas.

O critério de resistência térmica das estruturas foi adotado com base no tempo que instalações petroquímicas devem resistir antes de atingir a temperatura crítica tanto para estruturas quanto para o sistema elétrico. Em refinarias brasileiras existe a norma Petrobrás N-1756 – Projeto de proteção contra fogo em instalação terrestre que define o tempo seguro de duas horas. Ou seja, neste período de tempo a proteção passiva deverá garantir que estruturas e sistemas elétricos não atinjam suas temperaturas críticas específicas (550°C no caso do aço e 70°C para cabos elétricos).

## 6 MÉTODOS DE PROTEÇÃO PASSIVA

Neste capítulo, serão abordados as principais características e tipos de proteção passiva contra incêndio em estruturas e sistemas elétricos utilizados em indústrias e em edificações.

O princípio básico da proteção passiva é reduzir a taxa de transferência de calor para um elemento (colunas, sistemas elétricos, peças, etc) que seja submetido a exposição à chama direta sem que sejam necessárias quaisquer intervenções mecânicas, elétricas ou manuais. Da mesma forma, que o sistema de proteção ativa – composta de mangueiras, *sprinklers*, etc. – o sistema de proteção passiva necessita de programa de inspeções rotineiras para verificação das condições deste sistema.

Os principais tipos de proteção passiva que são comumente empregados foram mencionados no capítulo 1 e serão repetidos a seguir:

- Barreiras de proteção;
- Recobrimento com materiais resistentes a fogo (*fireproofing*);
- Isolamento térmico;
- Distâncias seguras;
- Sistemas para controle de derramamentos.

### 6.1 Barreiras de proteção

As barreiras de proteção servem para minimizar os danos pelo fogo, pois impedem que este se espalhe para outras áreas. Estas barreiras são tipicamente construídas com materiais não combustíveis, como por exemplo, alvenaria, concreto ou gesso. O uso deste tipo de proteção passiva é mais freqüente em edificações, mas são, ocasionalmente, usados para separar unidades de processo ou outras operações em que há risco iminente de incêndio.

O principal objetivo deste sistema é impedir a passagem do calor ou das chamas dentro de um período de tempo especificado para outras áreas. Desta forma, pode-se dizer que o fogo ficará confinado em uma determinada área facilitando o seu combate.

Estas barreiras de proteção podem ser paredes ou apenas divisórias sendo que a primeira forma fornece uma melhor proteção do que a segunda. O tipo, a localização, o *design* destas barreiras dependem de alguns fatores tais como tipo e severidade do incêndio, tamanho e configuração da área a ser protegida e outros.

Basicamente, a literatura “*Guidelines for Engineering Design for Process Safety*” apresenta algumas áreas em que é recomendado o uso de barreiras de proteção contra fogo. São elas:

- Áreas com diferentes tipos de ocupação como depósitos e unidades de produção;
- Entre áreas de processos não relacionados;
- Entre áreas normalmente ocupadas por pessoas como salas de controle ou escritórios e áreas de grande perigo de incêndio (depósitos, unidades de processo, etc.);
- Entre áreas com operações críticas como salas de equipamentos elétricos ou instrumentação e áreas de grande perigo de incêndio.

## **6.2 Recobrimento com materiais resistentes a fogo (*fireproofing*)**

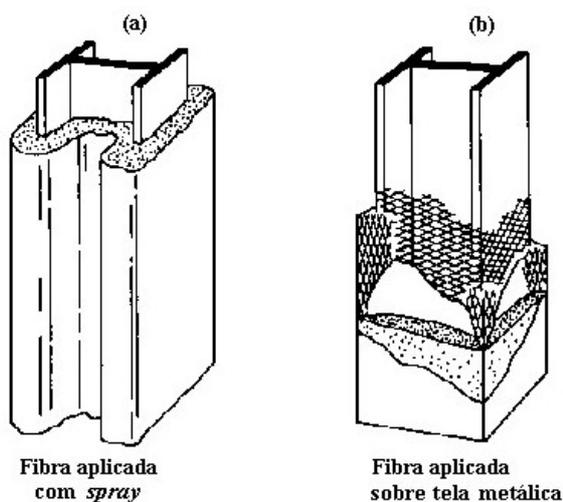
Como já foi mencionado, as estruturas de aço quando expostas ao fogo podem perder sua resistência mecânica e podem colapsar dependendo das condições e do tempo de duração do incêndio. Isto porque estas estruturas precisam atingir 550°C para que este fenômeno ocorra. Se esta falha ocorre, equipamentos e tubulações podem romper potencializando as consequências de um acidente pela liberação de material inflamável.

O recobrimento com materiais resistentes ao fogo é também desejável em estruturas de aço que promovem a sustentação dos próprios equipamentos sendo preferido para estes casos. O *fireproofing* é conseguido através de isolamento térmico utilizando materiais não-combustíveis que resistem a fogo por um tempo determinado. As principais formas de proteção utilizando este tipo de proteção passiva são as listadas a seguir.

### **6.2.1 Sistemas de recobrimento aplicados em camadas ou em forma de *spray***

Este sistema consiste em aplicar materiais diretamente na superfície da estrutura. Estes materiais podem ser reativos ao se aquecerem ou inertes termicamente. As reações químicas que podem ocorrer quando os materiais reativos ao calor são submetidos a altas temperaturas incluem a calcinação, intumescência, hidrogenação térmica e sublimação.

Muitos tipos de materiais que podem ser aplicados na forma de *spray* são comumente usados para a proteção de estruturas de aço contra fogo. Alguns exemplos destes materiais são: argamassa projetada, fibras minerais, cimento de magnésio e os produtos intumescentes. A figura 6.1 ilustra o mecanismo de proteção de elementos de aço utilizando os materiais recém referidos.

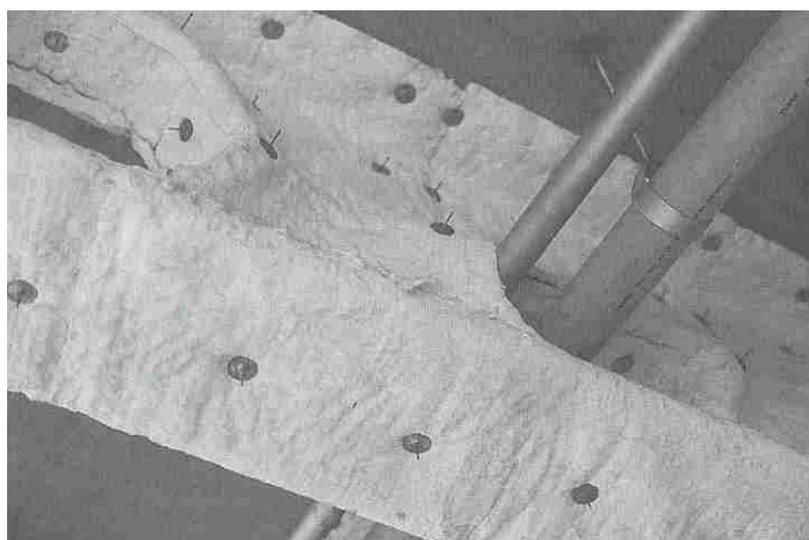


Fonte: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*

Figura 6-1 – Proteção de estruturas com materiais aplicados na forma de *spray*

### 6.2.2 Sistemas de revestimento por encapamento

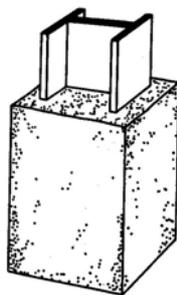
Este sistema consiste em envolver a estrutura com mantas ou lâminas flexíveis de materiais não combustíveis. Estes materiais devem ser presos na estrutura com ancoragem apropriada. Usa-se este tipo de proteção, principalmente, quando os elementos nos quais se deseja proteger contra o fogo estão suspensos. Estes materiais podem conter na sua composição gesso, perlita, vermiculita e/ou fibras minerais. A transferência de calor do ambiente para a estrutura de aço é reduzida devido ao espaço de ar acima da membrana e das características de isolamento da mesma. Estas mantas auxiliam no intuito de prevenir a ação direta da chama na estrutura. A figura 6.2 ilustra uma estrutura protegida com este tipo de elemento.



Fonte: arquivo Zigurate. Silva, 2001

Figura 6-2 – Estrutura revestida com manta cerâmica

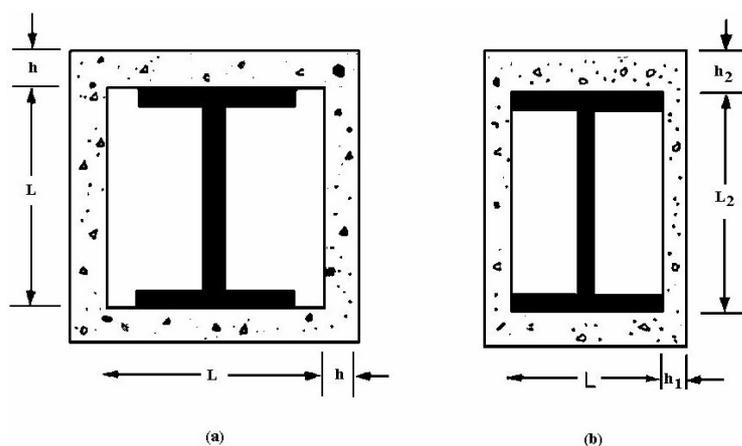
O recobrimento das estruturas de aço utilizando concreto pode ser para proteção ao fogo está apresentado na figura 6.3.



*Fonte: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*

Figura 6-3 – Estrutura recoberta com concreto

Conforme pode ser visualizado na figura 6.3, a estrutura é envolvida pelo concreto e todos os espaços vazios e re-entrâncias são preenchidos. Alternativamente, uma coluna de concreto pode ser construída conforme mostra a figura 6.4.



*Fonte: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*

Figura 6-4 – Forma de proteção de estruturas utilizando concreto

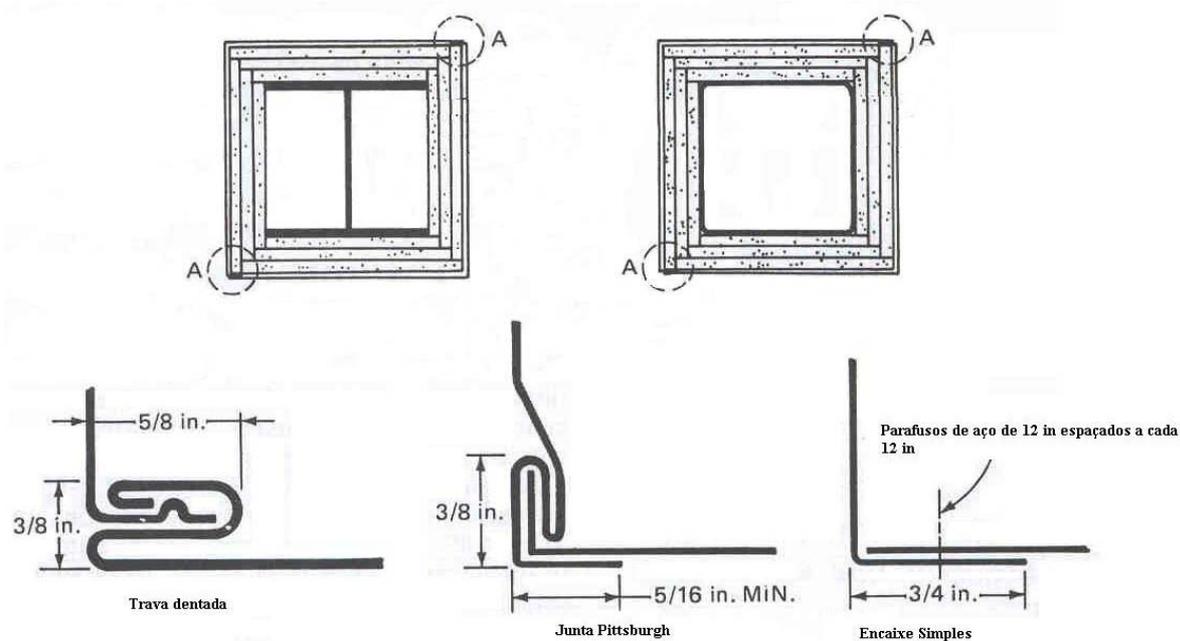
A função do concreto, em ambos os casos, é somente garantir a proteção térmica do aço. A capacidade de carga deste concreto e a possível composição entre aço e concreto são negligenciadas nesta proposta de cálculo.

### 6.2.3 Sistemas de caixas de proteção

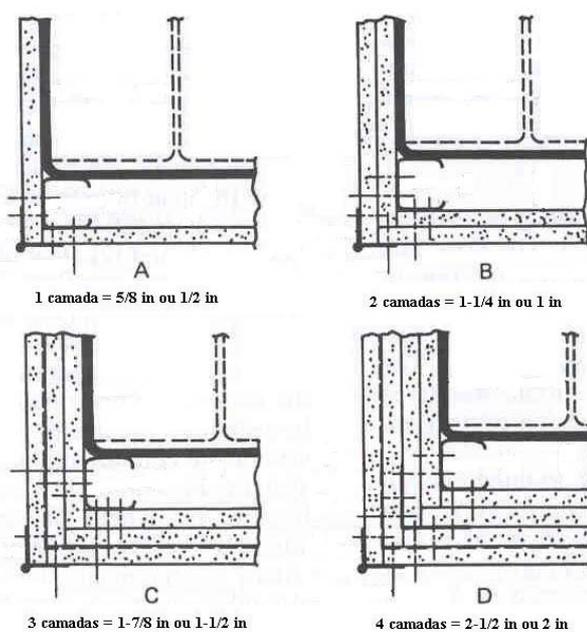
Este sistema consiste em proteger a estrutura envolvendo-a com uma caixa construída no seu entorno usando materiais não combustíveis como placas de gesso, painéis de materiais fibrosos.

Quatro tipos de produtos são comumente usados na proteção térmica de estruturas ou sistemas elétricos na forma de caixas de proteção: gesso, carbonato de cálcio reforçado com

fibras, vermiculita com silicato de sódio e fibras minerais em placas. Em cada caso, a junta de ligação entre as placas em torno do aço é o ponto crítico que afeta a performance do isolamento. Tradicionalmente, dois métodos usados para a união entre as placas de gesso com ou sem espaços vazios estão apresentados na figura 6.5. Os detalhes dos mecanismos de ligação entre as placas também podem ser visualizados nesta figura.



DETALHAMENTO DOS CANTOS (A)



Fonte: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering

Figura 6-5 – Mecanismos de ligação para aplicação de materiais na forma de placas

No caso deste estudo, a finalidade do *fireproofing* é a proteção do elemento estrutural ou do sistema elétrico sujeito a chama direta advindo de um incêndio.

Os materiais utilizados neste sistema de proteção passiva devem possuir as seguintes características:

1. Não ser combustível e ao ser submetido ao fogo não liberar fumaça ou gases tóxicos;
2. Ter capacidade de proteção térmica quando submetidos ao teste do incêndio padrão ASTM E-119 conforme N-1756 – Projeto de proteção contra fogo em instalação terrestre;
3. Ser um material de confiabilidade aceitável;
4. Estar disponível em diversas formas para permitir eficiência e uniformidade na aplicação;
5. Possuir suficiente resistência e durabilidade para prevenir danos a superfície durante as operações de montagem;
6. Resistência a intempéries e à corrosão resultantes de condições atmosféricas adversas;
7. Manter a integridade mecânica quando submetido a jato d'água promovido pelo combate à emergência por meio de proteção ativa.

Com relação à proteção de cabos elétricos, as características desejáveis para um revestimento são: material de proteção não tóxico, altamente elástico, excelente adesão, resistente à água, ao óleo, lama e fluidos para perfuração. Além disto, devem prevenir a combustão do isolante dos cabos, a emissão de gases tóxicos, emissão de gases venenosos e deformação das bandejas de cabos por ação do calor. A aplicação da proteção passiva contra incêndio em sistemas elétricos visa atender as exigências de seguradoras multinacionais como a FM Global e a IRI, além de exigências de Corpos de Bombeiros locais.

No caso de estruturas metálicas, se requerem características como isolante com alta eficiência térmica, resistência a altas temperaturas, leveza e custo. A escolha correta do material de proteção deve levar em consideração diversos aspectos, além de uma simples comparação de custos.

A área em que deve ser empregado o recobrimento de estruturas com materiais resistentes ao fogo depende de vários fatores tais como volume do material inflamável, tipo de cenário de acidente que vai ser gerado e outros. Neste trabalho, a delimitação da área sujeita a jatos de fogo e incêndio em poça foram determinadas com base em modelos já estabelecidos em análise de riscos e discutidos anteriormente.

Os principais locais recomendados para utilização de *fireproofing* são suporte de equipamentos como “pernas” de vasos e suporte de tubulações. Este sistema de proteção passiva pode ser aplicado também em equipamentos de processo e em sistema elétricos. Sendo que no caso de equipamentos de processo, requer uma análise mais profunda visto que a proteção não poderá influenciar nas variáveis de processo dos equipamentos protegidos. Portanto, não serão abordados neste trabalho.

A correta instalação deste sistema é fundamental para garantir a performance do *fireproofing*. Desta forma, pode-se destacar dois aspectos importantes para sistemas aplicados em camadas ou na forma de *spray* que são: a preparação da superfície que irá receber o recobrimento e a aplicação de uma camada protetora do recobrimento. Se a superfície não foi corretamente preparada, o material de recobrimento pode não aderir corretamente a superfície da estrutura e, conseqüentemente, não há garantia de que vai haver proteção ao fogo da forma esperada. Esta camada protetora ao recobrimento é comumente utilizada em atmosferas muito agressivas com alta corrosividade e, além disso, promovem mais facilmente a limpeza da superfície.

A manutenção destes sistemas, através de inspeções visuais com o objetivo de verificar possíveis danos, descamação ou deterioração da superfície, devem ser realizadas periodicamente. Caso seja encontrada alguma deterioração, o sistema de *fireproofing* deverá ser removido e prontamente ser restaurado sob pena de ineficiência do mesmo.

### **6.3 Isolamento térmico**

O isolamento térmico de vasos e ou equipamentos que são utilizados para que as variáveis de processo (pressão, temperatura, etc.) sejam mantidas dentro dos padrões necessários para que a produção da unidade seja efetuada podem também serem úteis na proteção destes equipamentos durante um incêndio.

### **6.4 Distâncias seguras**

Fogo, particularmente àqueles que envolvem hidrocarbonetos, podem gerar quantidades significativas de calor radiante e convectivo. Em conseqüência disto, a proteção contra fluxos radiantes de incêndios é necessária e plantas químicas e petroquímicas. O uso de distância segura como método de proteção passiva consiste, basicamente, em se determinar a distância mínima segura em que os fluxos térmicos já estejam abaixo de um certo patamar. Desta forma, os danos a equipamentos, sistemas elétricos ou pessoas aconteceriam se por ventura estiverem numa distância inferior à mínima. Este método é, por vezes, de cálculo muito complexo devido aos vários fatores que influenciam na determinação desta distância mínima.

Alguns destes fatores são: topografia da região, velocidade do vento, sistema de drenagem de derramamentos, localização dos equipamentos de combate ao fogo e outros.

### **6.5 Sistema de controle e drenagem de derramamentos**

Este sistema consiste em conter o derramamento de líquidos inflamáveis em uma área restrita para que não ocorra a ignição do mesmo. A construção de diques de contenção é o principal exemplo deste sistema. Pode-se ainda utilizar grandes quantidades de água liberadas através de sistema de *sprinklers*, por exemplo, e coletar este efluente em uma rede de esgoto de águas contaminadas direcionando para uma estação de tratamento. A desvantagem deste sistema é o grande volume de efluente gerado e possibilidade de dano ambiental sério.

### **6.6 Resumo**

As principais características e os tipos de proteção passiva contra incêndio em estruturas e sistemas elétricos utilizados em indústrias e em edificações foram discutidos neste capítulo. Como já mencionado, a proteção passiva tem por finalidade reduzir a taxa de transferência de calor para um elemento (colunas, sistemas elétricos, peças, etc) que esteja submetido a incêndio sem que sejam necessárias quaisquer intervenções para que isto ocorra.

Relembrando, os tipos básicos definidos para proteção passiva são barreiras de proteção, recobrimento com material não-combustível (*fireproofing*), isolamento térmico em equipamentos, relocação de sistemas elétricos, por exemplo, a distâncias seguras de incêndio de hidrocarbonetos e sistema de controle e drenagem de vazamentos.

## **7 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE ESTRUTURAS E SISTEMAS ELÉTRICOS EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO**

Neste capítulo serão apresentadas as três formas de se realizar a análise da resistência ao fogo dos elementos estruturais e sistemas elétricos. A curva-padrão que relaciona tempo-temperatura em elementos em situação de incêndio usada nesta análise também será discutida na seção 7.2. A análise da resistência de elementos de aço em situações de incêndio é importante para que se conheça e se faça o dimensionamento da proteção passiva.

### **7.1 Introdução**

Segundo Milke, 1988, tradicionalmente, a resistência ao fogo tem sido avaliada através de elementos estruturais submetidos a um teste padrão durante um tempo determinado. Todos os elementos com desempenho aceitável são divididos e listados pelo tempo de duração do teste, ou seja, uma hora, duas horas, etc. A comprovação da performance satisfatória do elemento estrutural pode ser realizada por uma das seguintes maneiras:

- a) Condução do teste padrão;
- b) Condução de experimentos específicos;
- c) Aplicação de uma técnica analítica.

O teste padrão pode requerer uma quantidade bastante grande de experimentos a fim de especificar, catalogar e analisar seus resultados. Um cuidado especial deve ser observado nestes experimentos a fim de obter dados precisos. Além disso, o custo envolvido na execução de um teste padrão pode ser considerável, visto que poderá ser necessário realizar várias tentativas até obter-se o resultado, sendo que as estruturas deverão ser reconstruídas para posterior aplicação do teste.

Por causa destes inconvenientes, métodos de cálculo têm sido desenvolvidos para analisar estruturas de diferentes projetos conceituais em condições de incêndio. Os métodos de cálculo têm sido formulados baseados em análises de dados extraídos destes testes padrões, de métodos experimentais e, em investigações teóricas.

Os métodos analíticos para resistência ao fogo podem considerar três aspectos básicos do problema:

- a) Exposição ao fogo;
- b) Transferência de calor;
- c) Resposta da estrutura frente ao fogo.

A exposição ao fogo da estrutura deve ser caracterizada como início do estudo. Isto pode ser feito usando métodos de análise de efeitos de acidentes como jato de fogo, incêndio em

poça para os casos de fogo real ou assumindo a exposição ao fogo especificados no teste padrão. A distribuição espacial e temporal da temperatura na estrutura pode ser calculada usando os princípios de transferência de calor por convecção e radiação. O calor no interior da estrutura é tratado como um problema de transferência de calor por condução (transferências de calor por convecção e radiação podem ser consideradas, se o elemento estrutural contiver vazios). Finalmente, a resposta da estrutura frente ao fogo é examinada pela investigação de alguns ou de todos os elementos conforme níveis de deflexão, estiramento e pressão.

Os métodos de cálculo são agrupados da seguinte forma:

- a) Correlações empíricas;
- b) Análise de transferência de calor;
- c) Análise estrutural.

As correlações empíricas estão baseadas na análise de dados resultantes dos experimentos com inúmeros testes padrões já realizados. Uma limitação destas correlações é que elas podem somente ser aplicadas quando se considera que a exposição ao fogo, carga e extensão esperadas são semelhantes as do teste padrão. Se outras condições são requeridas, uma abordagem diferente é necessária.

O segundo método de cálculo consiste na análise de transferência de calor. Tipicamente, o enfoque de diferenças finitas ou elementos finitos é necessário, sendo que é difícil se obter a solução exata da equação governante da transferência de calor. As condições de exposição ao calor podem ser àquelas associadas com o teste padrão ou fogo específico. A análise de transferência de calor permite determinar o tempo requerido pela estrutura para atingir a temperatura crítica. Como já mencionado anteriormente, tem-se que o critério de temperatura limite citado por diversas normas internacionais é frequentemente aceito como sendo a temperatura crítica, comumente em torno de 550°C. Tipicamente, imprecisões deste método estão relacionadas na dependência das propriedades do material com a temperatura.

A análise estrutural está baseada em cálculos similares àqueles conduzidos pelas propostas de engenharia estrutural, exceto que as propriedades do material são avaliadas em elevadas temperaturas com expansões térmicas consideráveis. Como na análise estrutural, o carregamento e as condições finais devem ser conhecidos ou assumidos. As limitações deste método resultam da incerteza na caracterização das condições finais e, novamente, na determinação das propriedades dos materiais em altas temperaturas.

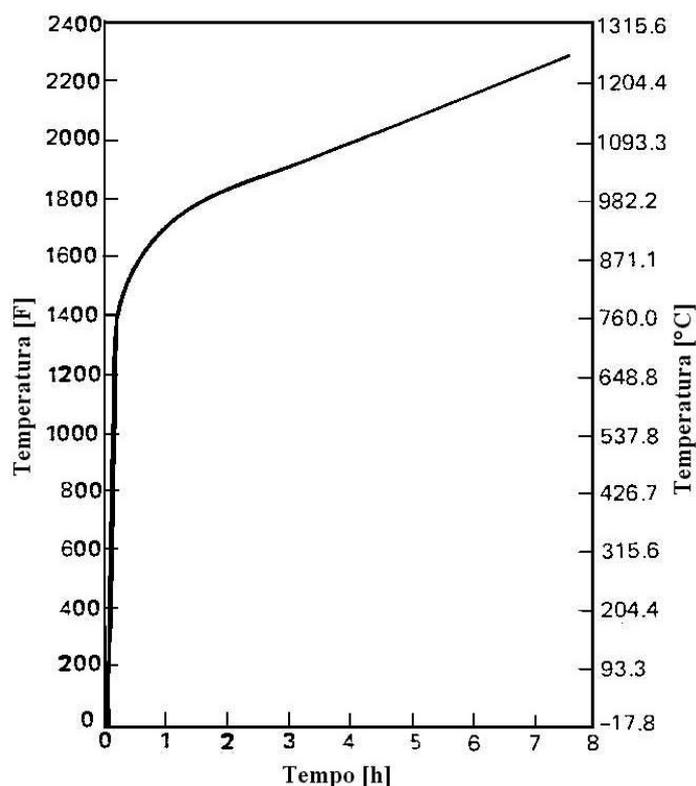
Neste trabalho somente será analisado o comportamento das estruturas frente ao fogo e o cálculo do dimensionamento de materiais de proteção. Desta forma, os métodos empregados

serão o uso das correlações empíricas e a análise de transferência de calor para estabelecer a espessura da proteção. Desta forma, poderão ser comparados estas duas abordagens.

## 7.2 Teste padrão para a avaliação da resistência de estruturas de aço frente ao fogo

Um dos métodos do teste padrão existentes para determinação da resistência ao fogo de colunas, pisos, telhados e paredes é baseado na *American Specification of Testing and Materials*, por meio da ASTM E-119, 1988 – *Standard test methods for fire tests of buildings construction and materials*. Basicamente, o teste consiste em submeter o componente estrutural num ambiente severamente quente por um tempo pré-estabelecido. Se os critérios de aceitação baseado nas características finais da estrutura não forem alcançados antes do término do teste, o elemento passa no teste e é listado.

Atualmente, em testes de laboratório nos Estados Unidos, usa-se queimadores a gás como fonte de aquecimento da estruturas. O processo de aquecimento se dá de maneira que a temperatura incidente no elemento siga a curva tempo-temperatura ilustrada na figura 7.1.



Fonte: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering

Figura 7-1 – Curva tempo-temperatura apresentada na norma ASTM E-119

É importante mencionar que, a curva tempo-temperatura destina-se a relacionar as condições num ambiente completamente em chamas. Assim, a aplicabilidade deste teste para

examinar a resistência ao fogo de estruturas de aço externas que não estariam expostas diretamente ao fogo é questionável.

Os elementos estruturais podem ser testados com ou sem carregamento. Se testados com carga, estes são simulados com o máximo de carga para induzir o máximo de pressão. Pisos, telhados e paredes são sempre testados sem carga. As colunas podem ser testadas com ou sem carga. As vigas podem ser testadas sem carga, se a carga que se deseja considerar não puder ser conseguida em laboratório.

Os conjuntos estruturais podem ser considerados restritos ou irrestritos contra a expansão térmica. Os efeitos da restrição na resistência ao fogo de conjuntos estruturais foram investigados por Bletzacker, 1966. O grau de restrição nos elementos da estrutura varia com a geometria, a maneira como estão ligados e o sistema de amarração, além de outros fatores.

O critério final de aceitação da resistência ao fogo da estrutura pela norma ASTM E-119 pode ser agrupado em três categorias: integridade estrutural, temperatura e ignição. Para os testes sem carga, a integridade estrutural é suavizada, pois apenas se deseja que o elemento permaneça em seu estado original. O critério de integridade estrutural é necessário para manter os elementos fixos e para suportar continuamente qualquer carga aplicada.

A temperatura final é selecionada de acordo com estimativas conservativas do máximo de redução de capacidade de carregamento atingida pela estrutura, baseada na redução média de força devido a altas temperaturas. Isto porque a exposição de materiais estruturais, como aço e concreto, a altas temperaturas degenera as características físicas e químicas causando a redução da resistência e da rigidez, o que deve ser levado em consideração no dimensionamento das estruturas em situação de incêndio.

Há outras curvas de teste-padrão, inclusive a UL-1709 – *Rapid Rise Fire Tests of Protection Materials for Structural Steel*, específica para incêndio com hidrocarbonetos. O fogo gerado por hidrocarbonetos, inerentes a áreas industriais, exige dos materiais de proteção desempenho muito superior do que o exigido aos materiais utilizados em edifícios comerciais, onde a carga combustível existente é equivalente a celulose.

As diferenças fundamentais entre as duas normas são:

1. A curva-padrão de fogo da norma ANSI/UL1709 é mais rigorosa que a da ASTM E119. Embora a temperatura final das duas curvas seja similar, após poucos minutos a temperatura padronizada de um incêndio gerado por hidrocarbonetos já atinge 1100°C, o que exige dos materiais de proteção passiva um comportamento compatível com a elevação mais rápida de temperatura. Concretos convencionais, por exemplo, são muito suscetíveis a

esta condição, porque a água existente em seu interior tende a evaporar muito bruscamente causando o fenômeno do *spalling*, que é a ruptura e o lascamento das suas camadas mais superficiais.

2. A norma ANSI/UL1709 determina que os materiais sejam testados também com relação à sua exposição a intemperismos, incluindo testes de envelhecimento, alta umidade, resistência à ambientes salinos, ciclos de mudanças extremas de temperatura e exposição a atmosferas ricas em dióxido de carbono e dióxido de enxofre. Estes ensaios visam avaliar a capacidade do material continuar exercendo sua função de proteção contra fogo mesmo vários anos após sua instalação.

Cabe lembrar que neste estudo foi levada em consideração a ASTM E119, pois para a unidade a ser dimensionada a proteção térmica contra fogo existe uma norma que prevê que estudos deste tipo deverão ser baseados nesta curva-padrão.

### **7.3 Resistência ao fogo de elementos de aço**

Muitas técnicas de cálculo estão disponíveis para a determinação da resistência ao fogo de estruturas metálicas. Estas técnicas incluem três tipos que, geralmente, são empregados como correlações empíricas, análise de transferência de calor e análise estrutural. Usando estas técnicas, a resistência ao fogo de colunas, vigas e de treliças metálicas podem ser determinadas. Também se pode calcular o perfil de temperatura, o nível de pressão e as deflexões atingidas por estas estruturas na situação de incêndio.

As equações e modelos não eliminam a necessidade de futuros testes. Os testes são necessários por diversas razões incluindo a validação da técnica de cálculo. Além disso, o comportamento mecânico dos materiais de proteção usados nestes elementos com o intuito de promover o isolamento térmico, somente pode ser examinado através de ensaios. Contudo, as técnicas de cálculo podem ser usadas para aumentar a aplicação dos resultados dos testes e/ou reduzir o número de testes requeridos.

#### **7.3.1 Correlações empíricas**

Segundo Milke, 1988, inúmeras correlações empíricas relacionando o tempo de resistência ao fogo, o perímetro de aquecimento, a espessura da proteção entre outras variáveis estão disponíveis para calcular a resistência ao fogo de estruturas metálicas baseadas nos dados obtidos através de diversos testes efetuados. Com base nos dados empíricos, técnicas de ajuste de curvas foram usadas a fim de estabelecer várias correlações. Em muitos casos, a “melhor curva”

foi obtida pelo conjunto de dados, mas em outros casos, fizeram-se estimativas mais conservativas e apenas foram conectados os pontos.

Estas correlações se destinam ao cálculo da espessura mínima em que a proteção passiva, utilizando um material como isolante térmico, garante a integridade da estrutura durante um período de tempo pré-estabelecido. Os testes de incêndio padrão utilizado para a determinação destas correlações foram baseados no ASTM E-119, o que para o caso deste trabalho está adequado visto que para a unidade em estudo, as avaliações correspondentes a incêndio são feitas com o referido teste segundo norma estabelecida.

As equações para estimar a resistência ao fogo de colunas metálicas, protegidas ou não, são dadas pela tabela 7.1 a seguir desenvolvidas por Jeanes, 1980, Stanzak, 1973 e PABCO, 1984.

Tabela 7-1 – Relações empíricas para cálculo da resistência de elementos de aço

Proteção	Equação
<b>Sem proteção</b>	$TR = 10,3 \cdot \left(\frac{W}{D}\right)^{-0,7} \quad \text{para } \frac{W}{D} < 10$ $TR = 8,3 \cdot \left(\frac{W}{D}\right)^{-0,8} \quad \text{para } \frac{W}{D} \geq 10$ Para atingir 550°C <span style="float: right;">(28)</span>
<b>Placas de gesso</b>	$TR = 130 \cdot \left(\frac{h \cdot W'}{2D}\right)^{0,75}$ $W' = W + \left(\frac{50 \cdot h \cdot D}{144}\right)$ <span style="float: right;">(29)</span>
<b>Materiais aplicados na forma de <i>spray</i></b>	$TR = \left[ C_1 \cdot \left(\frac{W}{D}\right) + C_2 \right] \cdot h$ Argamassa projetada: $C_1 = 69$ e $C_2 = 31$ Fibras minerais: $C_1 = 63$ e $C_2 = 42$ Fibras reforçadas com silicato de cálcio: $C_1 = 63$ e $C_2 = 26$ Vermiculita com silicato de sódio: $C_1 = 44$ e $C_2 = 30$ <span style="float: right;">(30)</span>
<b>Recobrimento de concreto – Proteção tipo contorno</b>	$TR = TR_0 \cdot (1 + 0,03 \cdot m)$ $TR_0 = 10 \cdot \left(\frac{W}{D}\right)^{0,7} + 17 \cdot \left(\frac{h^{1,6}}{k_c^{0,2}}\right) \cdot \left\{ 1 + 26 \cdot \left[ \frac{H_s}{\rho_c \cdot c_c \cdot h \cdot (L + h)} \right]^{0,8} \right\}$ <span style="float: right;">(31)</span>
<b>Recobrimento de concreto – Proteção tipo caixa</b>	$H_s = 11 \cdot W + \frac{\rho_c \cdot c_c}{144} \cdot (b_f \cdot d - A_s)$ $D = 2 \cdot (b_f + d_v)$ $L_c = \frac{(b_f + d_v)}{2}$ <span style="float: right;">(32)</span>

Os seguintes parâmetros são utilizados nestas correlações:

$A_s$  = área da seção transversal da coluna, [polegadas<sup>2</sup>];

$b_f$  = largura da viga, [polegadas];

$C_1$  e  $C_2$  = constantes específicas de cada material;

$c_c$  = calor específico do concreto na temperatura ambiente, [Btu.lb<sup>-1</sup>.°F<sup>-1</sup>];

$D$  = perímetro de aquecimento, [polegadas];

$d_v$  = profundidade da viga, [polegadas];

$h$  = espessura da proteção, [polegadas];

$H_s$  = capacidade térmica do aço na temperatura ambiente, [Btu.ft<sup>-1</sup>.°F<sup>-1</sup>];

$k_c$  = condutividade térmica do concreto na temperatura ambiente, [Btu.h<sup>-1</sup>.ft<sup>-1</sup>.°F<sup>-1</sup>];

$L_c$  = uma das dimensões da caixa de proteção do concreto, [polegadas];

$m$  = umidade contida no concreto, [% de volume];

$TR$  = tempo de resistência ao fogo, [min];

$TR_0$  = tempo de resistência ao fogo considerando o concreto isento de umidade, [min];

$W$  = massa específica linear, [lb.ft<sup>-1</sup>];

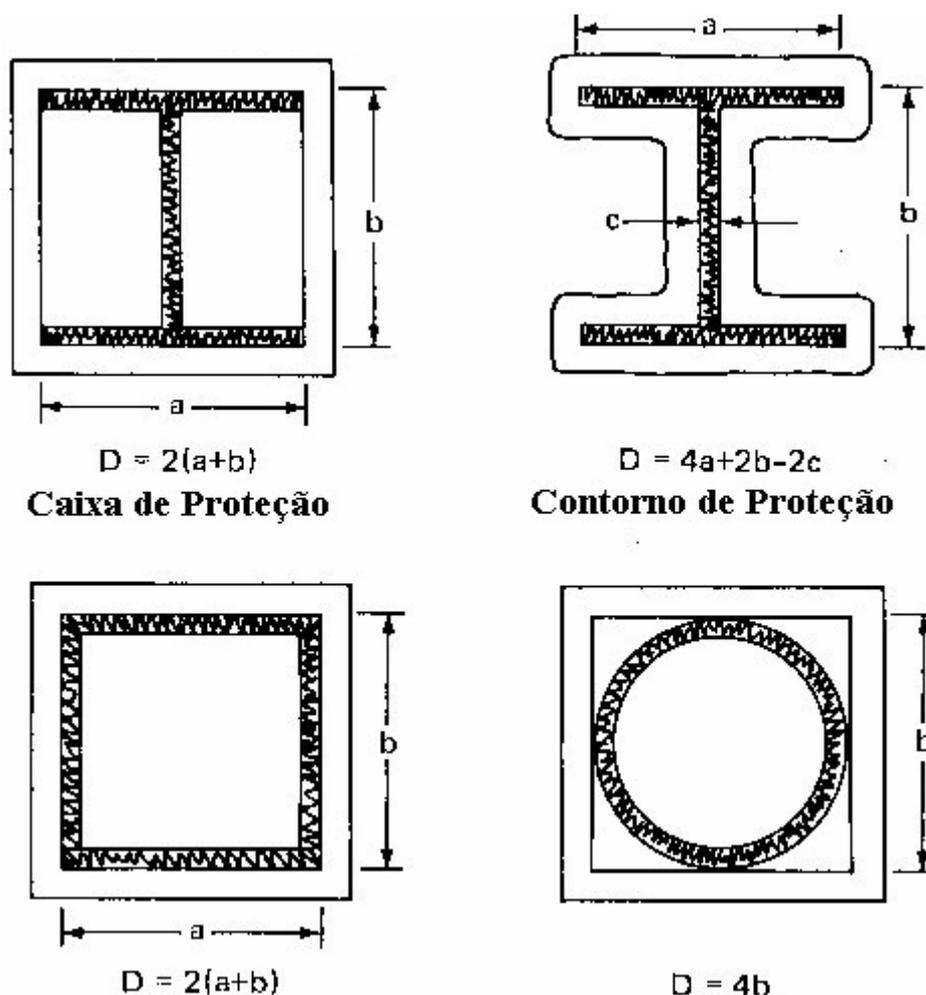
$W'$  = massa específica linear do gesso, [lb.ft<sup>-1</sup>];

$\rho_c$  = massa específica do concreto, [kg.m<sup>-3</sup>].

O parâmetro que está sempre presente nestas equações é  $W/D$ , ou seja, a massa específica linear pelo perímetro de aquecimento do aço na interface de proteção. Lie e Stanzak, 1973, estudaram este parâmetro. Dois fatores relacionados com  $W/D$  que afetam a taxa de transferência de calor são:

- i. A forma do sistema de proteção ao fogo (relação com  $D$ );
- ii. Massa específica linear do aço (relação com  $W$ ).

O parâmetro que caracteriza a forma do sistema de proteção ao fogo é o perímetro de aquecimento,  $D$ , expresso em polegadas, na qual é definido como o perímetro interno da estrutura na interface com o sistema de proteção. A figura 7.2 ilustra o método para determinação de  $D$  para quatro casos típicos.



Fonte: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering

Figura 7-2 – Perímetro de aquecimento

Como pode ser visto na figura, o perímetro de aquecimento depende das dimensões do elemento estrutural e do perfil do sistema de proteção. Dois diferentes perfis são usados:

- i. Perfil em contorno onde todas as superfícies do elemento estrutural de aço estão em contato com o material de proteção;
- ii. Perfil em caixa onde uma caixa retangular do material de proteção é construída em torno do elemento estrutural.

Quanto maior o valor de  $W$  num elemento estrutural maior será a massa específica linear. Quanto menor valor do perímetro de aquecimento,  $D$ , menor a área superficial disponível para a transferência de calor e, portanto menor o aumento da temperatura na estrutura.

O fato de que as estruturas com razões  $W/D$  grandes são mais resistentes ao fogo é a base que permite a substituição de formas com  $W/D$  maiores do que àquelas identificadas e listadas no *UL Fire Resistance Directory*, enquanto mantidas as mesmas espessuras de proteção.

Realmente, formas com W/D grandes requerem menos material de proteção do que àquelas com W/D pequenas para um mesmo nível de proteção.

As constantes  $C_1$  e  $C_2$  necessitam ser determinadas para cada material usado na proteção térmica e levam em consideração a condutividade térmica e a capacidade calorífica do material. Na tabela 7.1, já apresentada, está contida uma lista de valores de  $C_1$  e  $C_2$  para aqueles materiais mencionados nas correlações empíricas.

Considerando a equação para o método que recobre a estrutura com concreto,  $TR_0$  é a resistência a fogo da estrutura sem umidade. Contudo, é sabido que a resistência ao fogo é aumentada em aproximadamente 3% para cada 1% de umidade, ou seja,  $TR_0$  é multiplicado por um fator  $(1 + 0,03 \cdot m)$  onde  $m$  é a umidade de equilíbrio do concreto. Se a espessura da proteção e/ou as dimensões do elemento estrutural não são as mesmas nas direções vertical e horizontal, adotam-se os valores médios de  $h$  e  $L_c$ . A capacidade calorífica do concreto deve ser levada em consideração na determinação de  $H_s$ , se todas as re-entrâncias estiverem preenchidas.

Obviamente, somente alguns materiais referenciados na tabela 7.1, já apresentada, foram mencionados, sendo que há outros materiais propostos para proteção de estruturas contra fogo. Portanto, caso não se tenha um material de interesse pode-se avaliar a resistência ao fogo de uma estrutura revestida com material isolante através da equação proposta por McGuire, Stanzak e Law, 1975.

$$\frac{TR_2}{TR_1} = \left[ \frac{h_2 \cdot \left( \frac{W_2}{D_2} \right)}{h_1 \cdot \left( \frac{W_1}{D_1} \right)} \right]^{0,8} \quad (33)$$

onde os subíndices 1 refere-se ao modelo de teste e 2 refere-se a estrutura que se deseja determinar a proteção.

Esta equação está baseada na análise dimensional da transferência de calor por condução complementada por uma análise estatística dos dados de teste padrão que determina o expoente 0,8. A aplicação desta equação é feita para o cálculo da resistência ao fogo de dois elementos estruturais usando o mesmo material como proteção térmica. A fim de se utilizar esta equação, é necessário que se conheça a resistência ao fogo de um dos elementos.

Se o material utilizado na proteção térmica de estruturas for muito leve, ou seja, com massa específica menor do que  $800 \text{ kg.m}^{-3}$ , a capacidade térmica de proteção deste material não precisa ser considerada. Já para materiais muito densos, a capacidade térmica é levada em consideração através da equação proposta por Lie e Stanzak, 1973, que modifica o parâmetro  $W$ .

$$W = W_s + \frac{1}{2} \cdot D \cdot h \cdot \left( \frac{\rho_i \cdot c_i}{c_s} \right) \quad (34)$$

onde

$c_i$  = capacidade calorífica do material de proteção, [J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>];

$c_s$  = capacidade calorífica do aço, [J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>];

$W_s$  = massa do aço, [kg];

$\rho_i$  = massa específica do material de isolamento, [kg.m<sup>-3</sup>].

É importante ressaltar que as equações apresentadas na tabela 7.1 foram desenvolvidas para materiais específicos e são aceitas em códigos computacionais de organizações americanas. Recomenda-se que a equação (33) somente seja usada para obter uma estimativa preliminar da proteção térmica de estruturas frente ao fogo quando não se tem equações específicas disponíveis.

### 7.3.2 Análise de transferência de calor

A análise de transferência de calor é aplicada quando se deseja determinar o tempo requerido para a estrutura atingir a sua temperatura crítica com base na equação de transferência de calor. O período de tempo para que o elemento atinja a temperatura crítica é denominado de tempo de resistência ao fogo do elemento.

A temperatura crítica de um elemento estrutural pode ser determinada com base no critério de temperatura final citado no ASTM E-119 ou por uma avaliação estrutural que será brevemente apresentada na seção 7.3.3. Existem tipos distintos de análise de transferência de calor divididos em três grupos conforme segue:

- i. Métodos numéricos;
- ii. Soluções gráficas;
- iii. Códigos computacionais.

Diversos métodos numéricos, soluções gráficas e códigos computacionais estão disponíveis para se estimar o aumento de temperatura nas estruturas. As equações utilizadas são derivadas em modelos simplificados de transferência de calor.

#### 7.3.2.1 Métodos numéricos

Os métodos numéricos utilizados para cálculo da variação da temperatura no elemento estrutural com o tempo é uma das três maneiras de se realizar a análise de transferência de calor em estruturas em situação de incêndio. Neste trabalho, fez-se simulações utilizando a equação da difusão do calor para se determinar o perfil de temperatura no interior de sólidos com

o propósito de comparar os resultados de espessura de isolamento obtidos com os valores encontrados a partir das correlações apresentadas na seção 7.3.1.

Em Incropera, 1998, tem-se os elementos para estudar os problemas de transferência de calor por condução dependentes do tempo, ou seja, não-estacionários ou transientes. A dependência no tempo decorre de mudanças nas condições de contorno do sistema. Desta forma, se a temperatura superficial do elemento estrutural for alterada, conseqüentemente, a temperatura em cada ponto deste sistema também se alterará. Estas alterações continuarão até que uma nova distribuição estacionária de temperaturas seja atingida.

Para se determinar a dependência desta distribuição de temperaturas no interior de um sólido em relação ao tempo de exposição deste elemento a temperaturas mais elevadas, pode-se resolver a equação da difusão do calor. A equação de condução de calor em coordenadas cilíndricas é

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (35)$$

onde

$\dot{q}$  = taxa na qual a energia é gerada por unidade de volume do meio, [W.m<sup>-3</sup>];

$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$  = taxa de variação com o tempo da energia sensível térmica do meio por unidade de volume;

$r$ ,  $\phi$  e  $z$  = componente radial, circunferencial e axial, respectivamente;

$k$  = condutividade térmica do sólido, [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>].

A solução desta equação diferencial a derivadas parciais de 2<sup>a</sup>. ordem requer uma condição inicial e duas de contorno para cada dimensão. Esta solução pode ser bastante complexa dependendo das condições de contorno e da geometria do problema. Para o caso deste estudo, decidiu-se analisar o caso de um pilar de sustentação constituído por um tubo metálico, ou seja, o sólido selecionado para análise é um cilindro oco semi-infinito com variação de temperatura apenas na coordenada radial conforme figura apresentada a seguir.

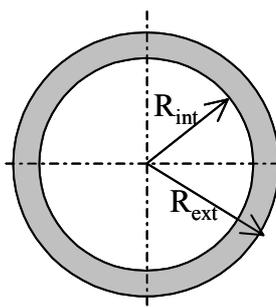


Figura 7-3 – Cilindro oco utilizado na simulação onde  $R_{int}$  é o raio interno e  $R_{ext}$  é o raio externo

### 7.3.2.1.1 Elementos estruturais não protegidos termicamente

Nesta seção, o problema de avaliação da distribuição de temperatura e sua variação com o tempo para elementos estruturais sem proteção térmica (isolamento) serão estudados. Primeiramente, é importante mencionar que para o sólido de análise (cilindro oco semi-infinito com variação de temperatura apenas na coordenada radial) existe uma solução analítica (ver Özişik, 1980). Contudo, a solução deste problema será obtida através de método numérico por ser de mais simples resolução.

Segundo Özişik, 1994, a modelagem através de método explícito para discretizar a equação da difusão de calor unidimensional em simetrias cilíndricas com raio interno  $R_{int}$  e raio externo  $R_{ext}$  (conforme figura 7.3) tendo a solução no domínio  $R_{int} \leq R \leq R_{ext}$  pode ser dividida em  $M$  camadas iguais de espessura

$$\delta = \frac{R_{ext} - R_{int}}{M} \quad (36)$$

onde

$\delta$  = espessura da subdivisão na variável espacial, [m];

$R_{int}$  = raio interno do cilindro [m];

$R_{ext}$  = raio externo do cilindro [m];

$M$  = número de subdivisões na variável espacial, [adimensional].

A figura 7.4 a seguir ilustra esta subdivisão levando em conta a discretização na variável espacial  $r$  onde  $i$  varia de 0 a  $M$ .

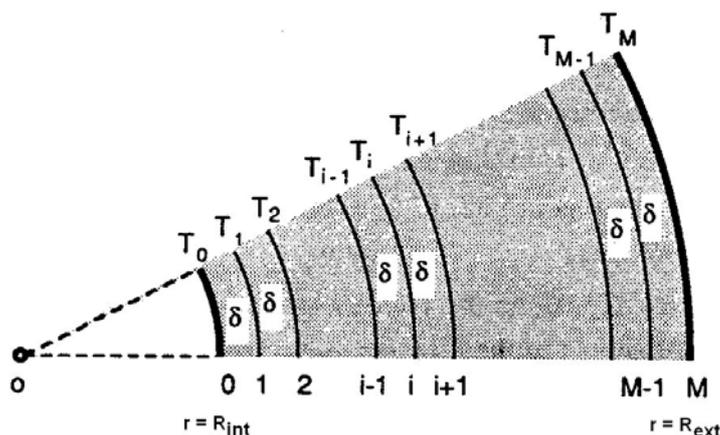


Figura 7-4 – Representação da discretização por diferenças finitas num cilindro oco

A equação governante de transferência de calor é dada pela equação (35) tendo as derivadas parciais em relação às coordenadas circunferencial e axial nulas, pois se considera que não a variação de temperatura nestes casos devido a estrutura estar totalmente imersa em fogo. Esta equação pode ser discretizada usando-se diferenças finitas por método explícito. A equação resultante para os nodos internos é dada por

$$T_{i,n+1} = r \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2 \cdot \left( \frac{R_{int}}{\delta} + i \right)} \right] \cdot T_{i-1,n} + (1 - 2 \cdot r) \cdot T_{i,n} + r \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2 \cdot \left( \frac{R_{int}}{\delta} + i \right)} \right] \cdot T_{i+1,n} \quad (37)$$

$$r = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{\delta^2} \quad (38)$$

onde

$n$  = subdivisões na variável temporal, [adimensional];

$r$  = relação entre a difusividade térmica do material, o intervalo de tempo e a espessura na divisão da variável espacial. Este valor deverá ser menor que 0,5 para garantir a estabilidade do método explícito utilizado neste cálculo.

Considera-se como condição inicial do problema que o perfil de temperatura é constante e igual à temperatura ambiente em todos os pontos do cilindro. No caso deste problema, usou-se como temperatura ambiente 25°C.

A equação (37) fornece (M-1) relações mas este problema envolve (M+1) pontos de temperatura desconhecidos  $T_{i,n+1}$ , para  $i = 0, 1, 2, \dots, M$  para cada intervalo de tempo. Desta forma, duas equações adicionais são necessárias para que o número de equações seja igual ao

número de incógnitas. Estas equações são obtidas utilizando-se as condições de contorno nas superfícies  $r = R_{\text{int}}$  e  $r = R_{\text{ext}}$ .

Na superfície  $r = R_{\text{int}}$ , em  $i = 0$ , a condição de contorno estabelece uma superfície perfeitamente isolada para o qual  $\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_{\text{int}}} = 0$ . Desta condição de contorno, pode-se obter a seguinte relação

$$T_{0,n+1} = (1 - 4 \cdot r) \cdot T_{0,n} + 4 \cdot r \cdot T_{1,n} \quad (39)$$

Na borda do cilindro, ou seja, na camada mais externa onde  $r = R_{\text{ext}}$ , em  $i = M$ , há além da transferência de calor por convecção, a transferência de calor por radiação. Esta é uma condição de contorno, conhecida como condição de Neumann ou de contorno de segunda espécie, que corresponde à existência de um fluxo térmico fixo ou constante na superfície. Esse fluxo térmico está relacionado ao gradiente de temperatura na superfície segundo a lei de Fourier. Esta relação, aplicada a este caso, é representada por

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = q''_{\text{sup}} \quad (40)$$

$$q''_{\text{sup}} = q''_{\text{c}} + q''_{\text{r}} \quad (41)$$

onde

$q''_{\text{sup}}$  = fluxo de calor total na superfície do cilindro [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ];

$q''_{\text{c}}$  = fluxo de calor por convecção na superfície do cilindro [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ];

$q''_{\text{r}}$  = fluxo de calor por radiação na superfície do cilindro [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ].

Desta forma, a condição de contorno, já discretizada na variável espacial e temporal, deverá levar em conta estes dois fenômenos acoplados da seguinte forma:

$$k \cdot \frac{T_{M+1,n} - T_{M-1,n}}{2 \cdot \delta} = h_c \cdot (T_{\infty} - T_{M,n}) + \frac{\varepsilon_s \cdot \varepsilon_c}{\varepsilon_c \cdot (1 - \varepsilon_s) + \varepsilon_s \cdot (1 - \varepsilon_c)} \cdot \sigma \cdot (T_{\infty}^4 - T_{M,n}^4) \quad (42)$$

onde

$h_c$  = coeficiente de transferência de calor por convecção, [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]. O valor recomendado para  $h_c$  é de  $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  segundo Ghojel, 1997 e Kay, 1996.

$\varepsilon_s$  = emissividade da superfície, [adimensional]

$\varepsilon_c$  = emissividade da chama, [adimensional]. O valor usado nas simulações foi de 0,95 pois considera-se que a chama tem comportamento próximo a de um corpo negro (emissividade igual a 1).

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$ .

Aplicando esta condição de contorno, obtém-se a relação a seguir donde se poderá determinar a temperatura na superfície do sólido no intervalo de tempo desejado

$$T_{M,n+1} = 2 \cdot r \cdot T_{M-1,n} + (1 - 2 \cdot r \cdot \beta) \cdot T_{M,n} - r \cdot \gamma \cdot \zeta \cdot T_{M,n}^4 + r \cdot \eta \cdot \zeta \cdot T_{\infty} + r \cdot \gamma \cdot \zeta \cdot T_{\infty}^4 \quad (43)$$

$$\beta = 1 + \left[ 1 + \frac{1}{2 \cdot \left( \frac{R_{int}}{\delta} + M \right)} \right] \quad (44)$$

$$\gamma = \frac{2 \cdot \delta \cdot \sigma}{k} \cdot \frac{\varepsilon_s \cdot \varepsilon_c}{\varepsilon_c \cdot (1 - \varepsilon_s) + \varepsilon_s \cdot (1 - \varepsilon_c)} \quad (45)$$

$$\zeta = 1 + \frac{1}{2 \cdot \left( \frac{R_{int}}{\delta} + M \right)} \quad (46)$$

$$\eta = \frac{2 \cdot \delta \cdot h_c}{k} \quad (47)$$

onde

$\gamma$ ,  $\zeta$ ,  $\eta$  = constantes que dependem das propriedades do material, características geométricas.

Esta rotina de cálculo foi desenvolvida no *software* MathCad 11.0 e os resultados da aplicação deste procedimento de cálculo serão apresentados e discutidos no capítulo 8.

### 7.3.2.1.2 Elementos estruturais protegidos termicamente

Nesta seção, será apresentado o caso de elementos estruturais protegidos por isolamento térmico. Para elementos estruturais protegidos termicamente contra fogo, a resistência térmica proporcionada pelo material de isolamento deve ser considerada.

O procedimento de discretização para elementos estruturais protegidos termicamente segue os mesmos passos já descritos anteriormente. Porém, deve-se mencionar que as equações (36), (37), (38), (42), (43), (44), (45), (46) e (47) deverão ser modificadas a fim de introduzirem as propriedades físicas do material de isolamento térmico. Esta rotina de cálculo foi desenvolvida no *software* MathCad 11.0 e os resultados da aplicação deste procedimento de cálculo serão apresentados e discutidos no capítulo 8.

### 7.3.2.2 Soluções gráficas

Devido à análise de transferência de calor ser muito trabalhosa e demorada e/ou envolver o uso de complexos códigos computacionais, soluções gráficas têm sido estudadas a fim de simplificar a estimativa de temperatura no aço. Estes gráficos de avaliação de resistência

ao fogo de estruturas de aço foram desenvolvidos por Malhotra, Jeanes, 1984, Lie e outros. Estes gráficos estão baseados no método de capacitância global descrito anteriormente.

Por exemplo, as curvas representam as soluções exatas das equações diferenciais que governam a transferência de calor para as estruturas protegidas termicamente e são aplicáveis para um intervalo grande de números de Fourier  $\left( Fo = \alpha \cdot t / h_i^2 \right)$ . Esta transferência de calor é assumida como sendo unidimensional através da camada de isolamento. Este método de cálculo não foi empregado neste trabalho.

### 7.3.2.3 Códigos computacionais

Muitos códigos computacionais estão disponíveis para estimar a variação de temperatura em estruturas de aço que permitem cálculos iterativos usando modelos de diferenças finitas e elementos finitos em estado quasi-estacionário. Alguns destes podem ser citados como o TASEF-2 e FIRES-T3 que foram desenvolvidos especificamente para condições em que estruturas de aço são submetidas ao fogo.

O TASEF-2 examina a transferência de calor por condução através do conjunto estrutura-isolamento. Estes conjuntos podem incluir os vazios internos, na qual modelos de transferência de calor por radiação e convecção podem ser considerados. Um de quatro tipos de cálculo de resistência ao fogo pode ser selecionado: temperatura constante, relação linear na curva tempo-temperatura, curva tempo-temperatura padrão ISO e, ainda uma curva tempo-temperatura especificada pelo usuário. O FIRES-T3 foi desenvolvido especificamente para examinar o aquecimento de estruturas de aço expostas a condições de incêndio. Foi aplicado com sucesso na determinação da variação de temperatura de colunas e vigas de aço. Maiores informações sobre estes códigos computacionais podem ser obtidos pelo *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 1990.

Por se tratarem de códigos comerciais, o seu uso requer a compra dos mesmos. Na presente dissertação, não se pode fazer uso de tais códigos.

### 7.3.3 Análise estrutural

O método de análise estrutural é usado para determinar o comportamento de uma estrutura sujeita a esforços onde, por meio de estimativa de alguns parâmetros chave, faz-se a avaliação do comportamento da estrutura. Os parâmetros são: deflexão, temperatura crítica ou carga crítica. Em diversos métodos, todos os três parâmetros podem ser considerados desde que estejam inter-relacionados. Para se fazer a análise estrutural referida, o uso dos códigos computacionais referidos anteriormente é necessário.

#### **7.4 Resumo**

Os métodos para análise da resistência ao fogo dos elementos estruturais e sistemas elétricos foram apresentados neste capítulo. Neste trabalho, serão utilizadas as correlações empíricas para dimensionamento das estruturas e análise de transferência de calor para validação destas equações. Os resultados obtidos nestes cálculos serão apresentados no capítulo seguinte.

## 8 PROTEÇÃO PASSIVA CONTRA FOGO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS E SISTEMAS ELÉTRICOS

Neste capítulo, serão apresentados os elementos estruturais para os quais serão determinadas as espessuras dos materiais de proteção passiva contra incêndio. Com base nos resultados obtidos no cálculo das espessuras destes materiais, será realizada a escolha do material de proteção mais adequado para cada caso.

Os elementos estruturais a serem analisados neste estudo foram selecionados mediante inspeção visual nos locais sujeitos a incêndio. A partir disto, selecionou-se três tipos de estruturas a serem protegidas contra incêndio, as quais estão exemplificadas nas figuras 8.1 e 8.2.



Figura 8-1 – Elementos estruturais a serem protegidos: coluna de seção circular (seta vermelha) e bandeja de cabos com seção retangular (seta azul)



Figura 8-2 – Elemento estrutural a ser protegido: coluna de seção em I (seta vermelha)

Os três casos que foram selecionados para o estudo são:

**Caso a:** coluna de seção tubular cilíndrica exposta a incêndio em todos os lados.

Exemplo: colunas de sustentação estrutural circulares, etc.

**Caso b:** seção tubular de forma retangular exposta a incêndio em todos os lados.

Exemplo: caixas de sustentação de cabos elétricos.

**Caso c:** colunas de seção tubular de forma em I exposta a incêndio em todos os lados. Exemplo: colunas de sustentação estrutural em forma de I.

### 8.1 Análise sem proteção passiva contra incêndio

Nesta seção será abordada, a análise da temperatura no elemento estrutural para os casos a, b e c, sem proteção passiva contra incêndio usando a correlação empírica – equação (28). Por métodos numéricos, foi realizada a análise de transferência de calor somente para perfis cilíndricos. Conforme já mencionado anteriormente, a transferência de calor por radiação e/ou convecção que provoca aumento de temperatura na estrutura é movida por uma diferença de temperatura entre a própria estrutura e os gases aquecidos.

Para um elemento estrutural submetido a gases aquecidos com perfil de temperatura definidos na figura 7.1, estima-se com base nas correlações empíricas o tempo para a

temperatura atingir 550°C na superfície externa da estrutura para os casos onde não há proteção passiva e na interface entre a estrutura e o material de proteção, quando existe proteção.

Primeiramente, serão apresentados os resultados obtidos através da correlação empírica – equação (28) – na tabelas 8.1 a seguir com os seguintes dados:

- i. Massa específica linear do aço:
  - $W = 53,46 \text{ lb.ft}^{-1}$  para perfis circulares conforme dados fornecidos pelo corpo técnico da unidade de craqueamento;
  - $W = 1,20 \text{ lb.ft}^{-1}$  para perfis retangulares conforme dados fornecidos pelo corpo técnico da unidade de craqueamento;
  - $W = 35,00 \text{ lb.ft}^{-1}$  para perfis em forma de I conforme dados fornecidos pelo corpo técnico da unidade de craqueamento;
- ii. Para seção circular, a avaliação foi realizada para diâmetro de 6" e espessura de parede de 1";
- iii. Para seção retangular (bandeja de cabos elétricos), foi considerado largura de 30,50 cm e altura de 3,80 cm;
- iv. Para seção em forma de I, foi considerado largura da aba do perfil (a) de 15,20 cm, altura do perfil (b) de 4,50 cm e espessura da alma (c) de 0,76 cm (ver figura 8.3 );

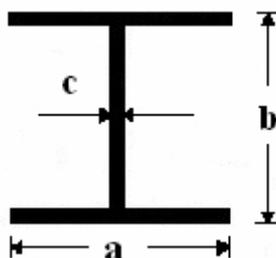


Figura 8-3 – Dimensões do perfil I

- v. Os perímetros de aquecimento para os perfis foram calculados com base na figura 7.2.

Tabela 8-1 – Avaliação do tempo para o elemento estrutural sem proteção passiva contra incêndio atingir 550°C

<b>Tipo de estrutura</b>	<b>R [min]</b>
<b>Seção circular</b>	21,37
<b>Seção retangular</b>	1,17
<b>Seção em forma de I</b>	12,35

Para o caso de seções retangulares, como as bandejas de cabos elétricos, o tempo para que o elemento metálico atinja  $550^{\circ}\text{C}$  é de, aproximadamente, 1,17 minutos. Torna-se claro perceber que se o elemento metálico atinge a temperatura de  $550^{\circ}\text{C}$  em tão pouco tempo, os cabos elétricos serão diretamente afetados quase que imediatamente visto que a temperatura crítica para este caso é de apenas  $70^{\circ}\text{C}$ . Para seções em forma de I, este tempo é de 12,35 minutos.

Na norma Petrobrás N-1756 está definido que  $250^{\circ}\text{C}$  é a temperatura crítica máxima ser atingida em duas horas de chama direta em estruturas metálicas. Porém, as correlações empíricas foram desenvolvida para mensurar o tempo até que a estrutura atinja  $550^{\circ}\text{C}$ . A correlação foi utilizada com o intuito de verificar a ordem de grandeza do tempo envolvido onde pode-se perceber que os tempos envolvidos para que a temperatura atinja  $550^{\circ}\text{C}$  são relativamente curtos, ou seja, para que a estrutura metálica atinja  $250^{\circ}\text{C}$  os tempos serão menores ainda. Pelo método numérico, pode-se avaliar o tempo até que estruturas de perfil cilíndrico atinja  $250^{\circ}\text{C}$

Pode-se perceber que rapidamente as estruturas de aço, em situação de chama direta irão alcançar a temperatura crítica e, conseqüentemente, iniciar a redução de suas propriedades mecânicas. Por exemplo, para uma seção circular com diâmetro de 6 polegadas e espessura de 1 polegada, o tempo para que o aço atinja a sua temperatura crítica, ou seja,  $550^{\circ}\text{C}$ , é de, aproximadamente, 21,37 minutos usando a correlação empírica – equação (28).

Foi realizado o cálculo de transferência de calor para perfis cilíndricos usando a equação de transferência de calor via método numérico. O resultado encontrado para esta avaliação foi de, aproximadamente, 4,57 minutos para que a temperatura na borda externa do cilindro atinja  $550^{\circ}\text{C}$  e de 2,17 minutos para que atinja  $250^{\circ}\text{C}$ . Desta forma, pode-se perceber que embora a correlação empírica utilizada apresente resultados menos conservativos, esta possui a vantagem de ser mais simples de ser usada, pelo menos, nos casos de perfis cilíndricos.

Com base nos resultados apresentados anteriormente, vê-se que um equipamento, elemento estrutural ou sistema elétrico quando atingido por fluxos térmicos suficientemente altos ou chama direta, poderão sofrer danos com conseqüente comprometimento à segurança da unidade muito rapidamente. Desta maneira, o dimensionamento de uma proteção passiva contra incêndio nestes locais torna-se muito importante.

## **8.2 Análise com proteção passiva contra incêndio**

Nesta seção, será analisada a proteção passiva contra incêndio de elementos estruturais da unidade de craqueamento catalítico tomando-se as principais características dos

materiais de proteção. Os resultados obtidos foram determinados com as equações apresentadas na seção 7.3.1.

A correta escolha do material de proteção, deve-se levar em consideração diversos aspectos além de uma simples comparação de custos. Os mais importantes são:

- aparência, em função da necessidade ou não de requinte estético;
- resistência mecânica
- resistência a intemperismos;
- requisitos dimensionais (interferências com bandejamentos, dutos, etc.);
- período da obra (grau de limpeza necessária, viabilidade de soldagem de ancoragens, etc.);
- velocidade de aplicação;
- custo.

Segundo empresas especializadas na aplicação de sistemas para proteção contra fogo de estruturas metálicas, os materiais aplicados na forma de *spray* (ou ditos projetados) são os mais utilizados para a proteção de estruturas em todo o mundo. A introdução destes materiais no Brasil foi a maior responsável pela queda dos preços da proteção de estruturas metálicas. Dentre os principais materiais aplicados para proteção passiva contra incêndio pode-se ressaltar a tinta intumescente, as mantas e o concreto refratário. A resistência ao fogo de cada material dependerá da severidade do fogo, da geometria da peça, das condições de suporte e ancoragem e, sobretudo, do material constituinte.

A seguir, serão apresentadas algumas das alternativas de materiais disponíveis para proteção passiva contra incêndio para estruturas e sistema elétrico.

### **1. Placas de gesso**

As placas de gesso rígidas oferecem acabamento similar às placas de gesso acartonado, permitem acabamento e pintura com grande resistência mecânica sendo ideais para colunas aparentes.

### **2. Argamassas à base de vermiculita**

Argamassas à base de vermiculita são ideais para áreas industriais e equipamentos; porém de aplicação lenta, requerendo cuidados na limpeza; podem permanecer expostos e suportam intemperismos.

### **3. Fibras cerâmicas silico-aluminosas**

As fibras cerâmicas silico-aluminosas podem ser obtidas em forma de flocos, mantas, placas e massas resistentes ao fogo. As principais características deste material são:

incombustibilidade, baixa condutibilidade térmica, peso reduzido, flexibilidade de instalação, montagem limpa e segura, temperatura limite de 1260°C. E, ainda, possuem excelente resistência a ataques químicos, exceto aos ácidos fluorídrico e fosfórico, e álcalis fortes (ex. Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O). Esta fibra não é afetada por óleo ou água. Suas propriedades térmicas e físicas são restauradas após secagem.

#### **4. Concretos vermiculíticos**

Os concretos vermiculíticos são sistemas compostos por argamassa à base vermiculita expandida, cimento hidráulico e aglomerantes minerais. O concreto vermiculítico possui acabamento rústico e é um sistema caro, porém possui as vantagens de ter grande resistência mecânica, suportar intemperismos e atmosferas quimicamente agressivas. É muito utilizado em indústrias petroquímicas, plataformas de petróleo ou em estruturas sujeitas à abusos mecânicos elevados.

Comparando-se os concretos refratários normalmente usados na proteção passiva contra fogo com o concreto comum, pode-se concluir que a preferência no uso deve ser para o primeiro. Isto porque são cerca de 1/3 mais leves que o concreto comum, necessitam de uma espessura menor para resistirem o mesmo tempo de fogo, a ancoragem é mais simples requerendo menos quantidade de pinos de sustentação, durante o aquecimento numa situação de incêndio não propiciam o fenômeno de migração e conseqüente colapso de gotículas de água na sua superfície, fato este que leva a fragilidade do material. Uma importante observação é que os concretos refratários não são arrancados da estrutura quando do uso de mangueiras de incêndio com água a alta pressão em sua superfície durante um combate a emergência. Podem ser aplicados na forma de projeção (*spray*) ou com o uso de espátulas, sendo que a primeira maneira é mais eficiente e garante o controle da espessura do material. Frequentemente, é usado para proteger estruturas metálicas e bases de equipamentos.

#### **5. Tinta intumescente**

A tinta intumescente possui amplo espectro de espessuras em que podem ser aplicados variando entre 200 µm e 5 mm. Esta tinta é estável para temperaturas menores que 180°C, quando a temperatura atinge este limite o fenômeno da intumescência inicia e ocorre a expansão da espessura, podendo chegar de 50 a 60 vezes o valor da espessura original. Pode-se dizer que a tinta intumescente provoca um isolamento progressivo conforme o aumento da temperatura. Cabe mencionar que a força de expansão se molda às estruturas vizinhas não comprometendo a mesma. A manutenção é bastante simples, bastando uma inspeção visual a cada 5 anos. E, é claro, após a ocorrência de um incêndio, esta camada deverá ser removida, a superfície deverá ser limpa e deve-se reaplicar a tinta intumescente. Este tipo de proteção passiva

é muito utilizado para cabos elétricos e também, para estruturas metálicas, sobretudo quando o espaço disponível para aplicação de um material de proteção passiva for muito exíguo. Seu custo comparado com o concreto refratário é cerca de 4 vezes maior, portanto seu uso deve ser racionalizado. Depois de ocorrer a intumescência, num evento acidental onde a temperatura se eleva acima de 180°C, o material se torna frágil e a força da água de combate a incêndio tenderá a arrancá-la da superfície. Porém, este fato não depõe contra o uso da tinta intumescente, pois a proteção passiva atua justamente nos momentos iniciais quando o combate a emergência ainda não está operante.

## **6. Mantas refratárias**

As mantas refratárias também pode ser usadas na proteção de bandejas de cabos elétricos, principalmente por garantirem melhor performance em casos de chama direta. Porém, sua aplicação é de difícil execução, sobretudo quando as bandejas tiverem níveis diferentes, curvas e outras configurações. Estas mantas possuem, em geral, duas polegadas de espessura. São utilizadas como barreiras de proteção com as tintas intumescentes, ou seja, nos locais onde o encapsulamento das bandejas de cabos elétricos favoreça seu uso ou nas áreas de maior risco de chama direta recomenda-se usá-las. E, em áreas onde o espaço físico é reduzido, dá-se preferência o uso de tintas intumescentes.

### **8.3 Avaliação do comportamento dos materiais de proteção passiva**

Para os elementos estruturais em análise neste estudo, fizeram-se cálculos até 120 minutos, pois este tempo é considerado como sendo o tempo de resistência requerido ao fogo ou TRRF, ou simplesmente TR. Este tempo é determinado por uma norma da indústria de refino de petróleo ou através de normalizações pertinentes. No Brasil, o TR para construção civil normalmente situa-se entre 30 minutos e 2 horas. Nos EUA, Europa e Japão os requisitos podem ser até mais rigorosos, atingindo 4 horas de proteção para o caso de edifícios residenciais e comerciais. Para o caso de instalações industriais, o critério de resistência térmica das estruturas foi adotado com base no tempo indicado pela instalação, como por exemplo, em refinarias brasileiras existe a norma Petrobrás N-1756 – Projeto de proteção contra fogo em instalação terrestre que define o tempo de duas horas. Ou seja, neste período de tempo a proteção passiva deverá garantir que estruturas e sistemas elétricos não atinjam temperaturas capazes de comprometer a sua integridade.

As mesmas considerações feitas para o caso de não haver proteção passiva, apresentadas anteriormente, valem para este caso. Além disso, a espessura da proteção térmica das seções circulares foi determinada utilizando diâmetro de 6” utilizando as correlações e o método numérico proposto. Na tabela 8.2 a seguir, estão apresentados os resultados obtidos para

o dimensionamento da proteção passiva para cada material de proteção disponível usando as correlações empíricas.

É importante mencionar que no caso de perfis retangulares está se avaliando somente a parte metálica, ou seja, as bandejas de cabos elétricos. Para a proteção dos próprios cabos elétricos, recomenda-se o uso de tinta intumescente e de mantas refratárias. Além disso, recomenda-se avaliar a possibilidade de relocação das bandejas de cabos elétricos para locais externos a área de processo. Isto se deve ao fato de que estas bandejas contendo os cabos elétricos estão dispostas, em alguns casos, desnecessariamente pelo interior da unidade. Por exemplo, existem locais onde a central de distribuição de cabos elétricos está localizada ao lado de sistemas de bombeamento de materiais inflamáveis sem qualquer barreira de proteção conforme pode ser observado na figura 3.4.

Tabela 8-2 – Avaliação da espessura da proteção passiva necessária para que o elemento estrutural não atinja a temperatura de 550°C no tempo de 120 min

Material de proteção	Espessura da proteção térmica [mm]		
	Seção circular	Seção retangular	Seção em forma de I
<b>Placas de gesso</b>	18,5	56,1	18,3
<b>Argamassa projetada<sup>(1)</sup></b>	13,5	89,4	25,1
<b>Fibras minerais</b>	13,8	68,1	24,6
<b>Fibras minerais reforçadas com silicato de sódio</b>	14,9	105,9	28,2
<b>Vermiculita com silicato de sódio</b>	19,7	95,5	35,1
<b>Recobrimento com concreto – tipo contorno</b>	34,5	67,8	39,6
<b>Recobrimento de concreto – tipo caixa</b>	32,8	67,8	37,1

Nota:

<sup>(1)</sup> Argamassa projetada, fibras minerais, fibras minerais reforçadas com silicato de sódio e vermiculita com silicato de sódio são materiais de proteção aplicados na forma de spray

De posse da tabela 8.2 pode-se concluir que para estruturas com perfil cilíndrico, o material que exige uma menor espessura é a argamassa projetada enquanto que o recobrimento com concreto com proteção do tipo caixa precisa de uma espessura maior para o mesmo tempo de proteção. Já para estruturas com perfil retangular, as placas de gesso e as fibras minerais reforçadas com silicato de sódio são, respectivamente, os materiais que exigem menor e maior espessura para um mesmo tempo de proteção. Para proteção do tipo caixa nas estruturas em I, tem-se as placas de gesso com uma espessura menor e as placas de concreto com uma espessura maior para um mesmo tempo de proteção.

As figuras a seguir ilustram o dimensionamento da proteção térmica das estruturas em caso de incêndio realizado com base nas correlações empíricas apresentadas na seção 7.3.1 deste trabalho. Estas figuras, que são a representação gráfica das equações (29) a (32), servem para visualizar o tempo em que a estrutura atinge determinada temperatura em função da espessura de proteção. Por exemplo, para a figura 8.4 a seguir, o tempo em que a estrutura de perfil cilíndrico atinge 550°C (temperatura crítica) é de 74,18 minutos para uma espessura de material de proteção de 0,4 polegada. Estas figuras servem para ilustrar a relação entre a espessura da proteção e o tempo que a estrutura leva para atingir sua temperatura crítica.

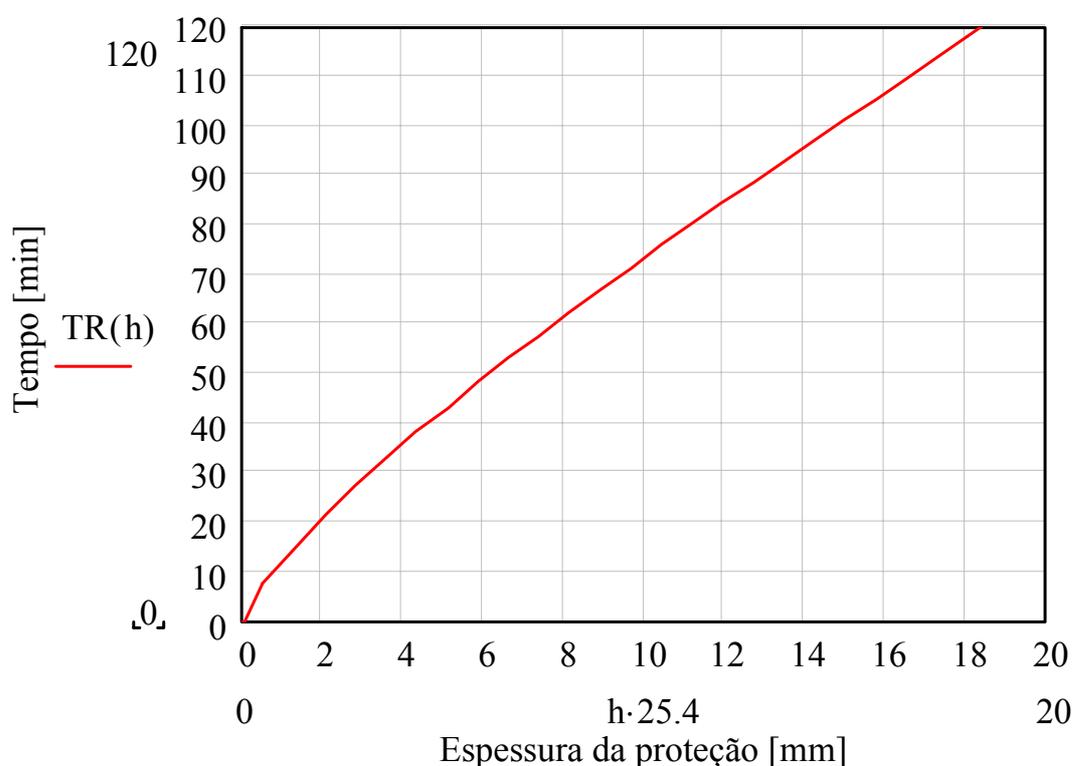


Figura 8-4 – Tempo que a estrutura de perfil cilíndrico leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Placas de gesso

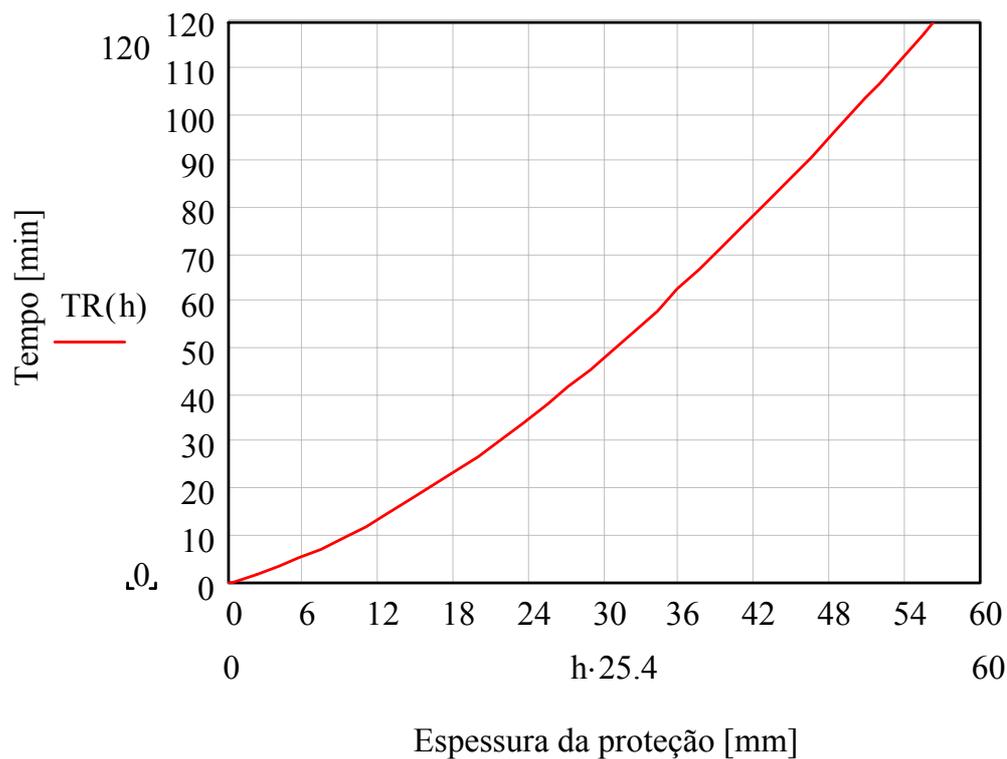


Figura 8-5 – Tempo que a estrutura de perfil retangular leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Placas de gesso

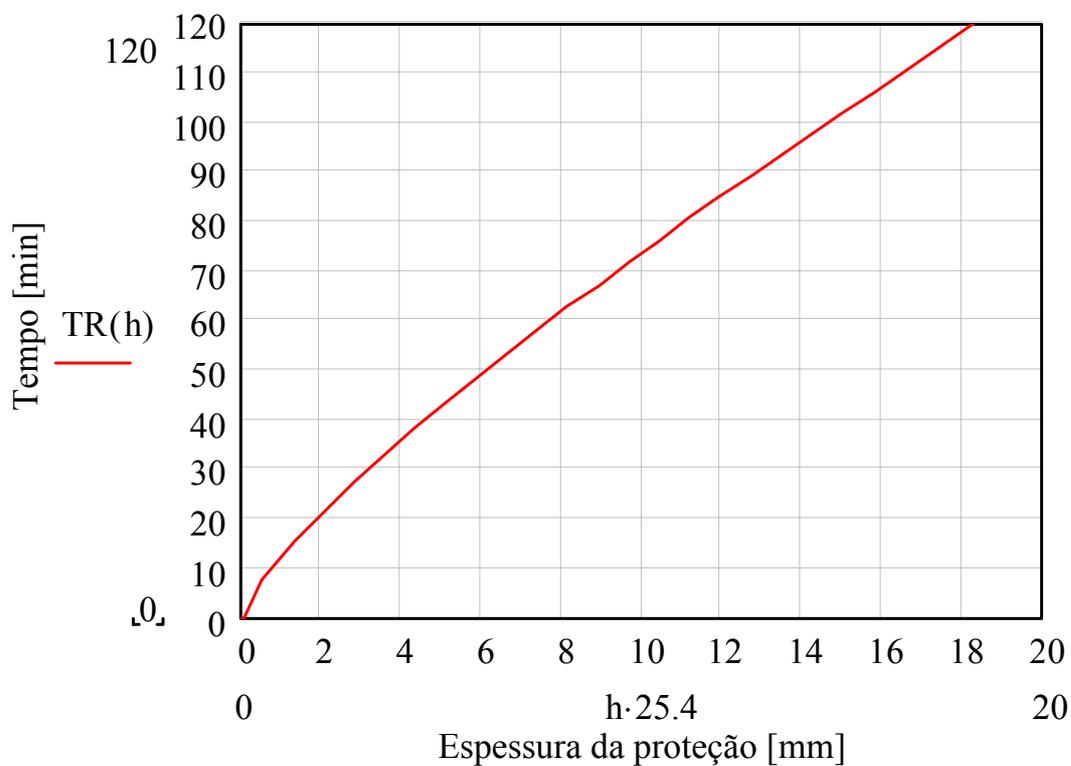


Figura 8-6 – Tempo que a estrutura de perfil em I leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Placas de gesso

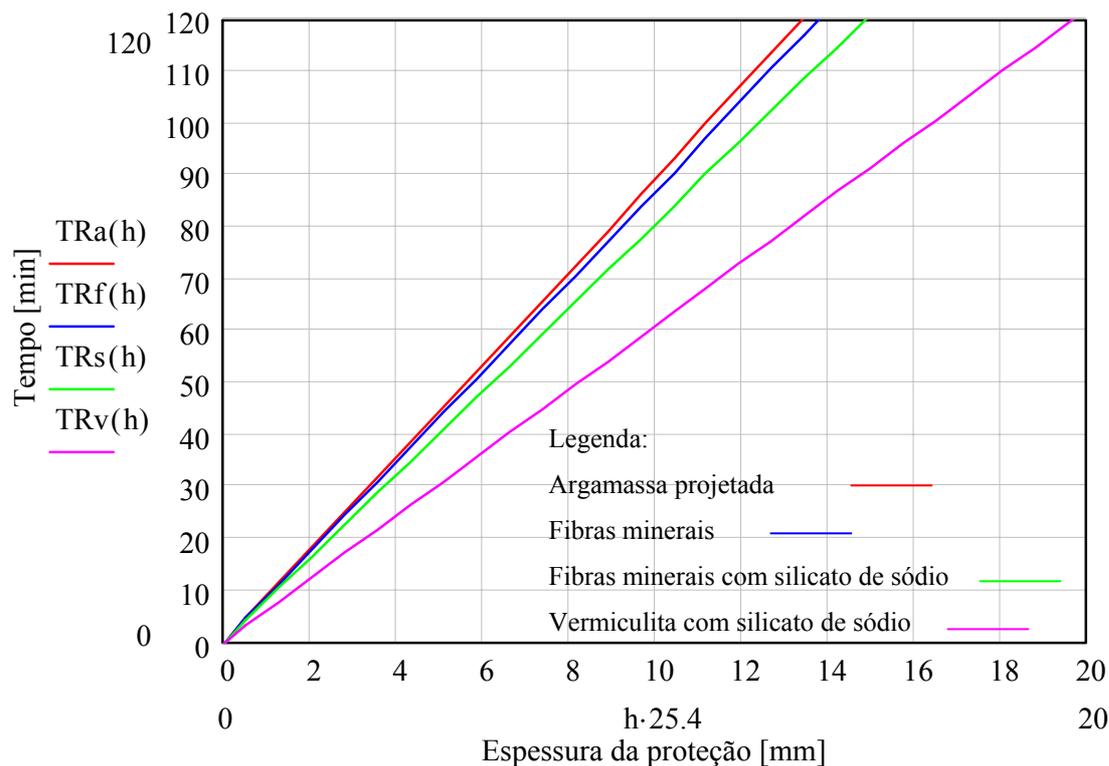


Figura 8-7 – Tempo que a estrutura de perfil cilíndrico leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Materiais aplicados na forma de spray

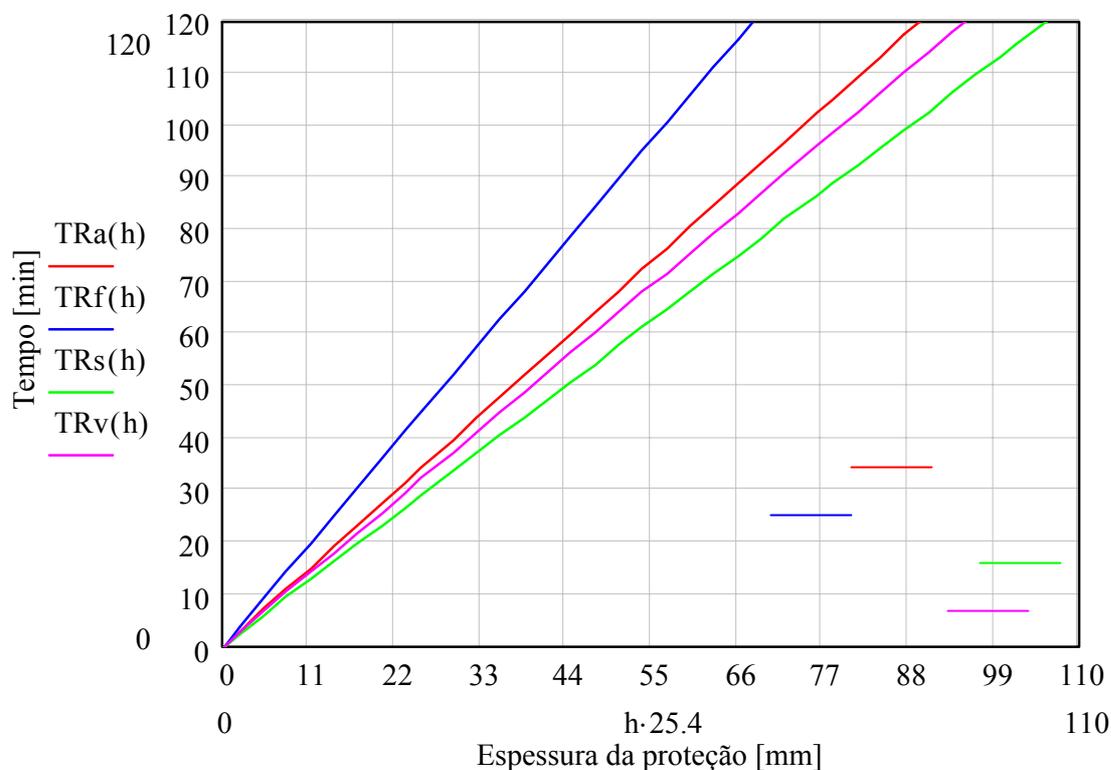


Figura 8-8 – Tempo que a estrutura de perfil retangular leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Materiais aplicados na forma de spray

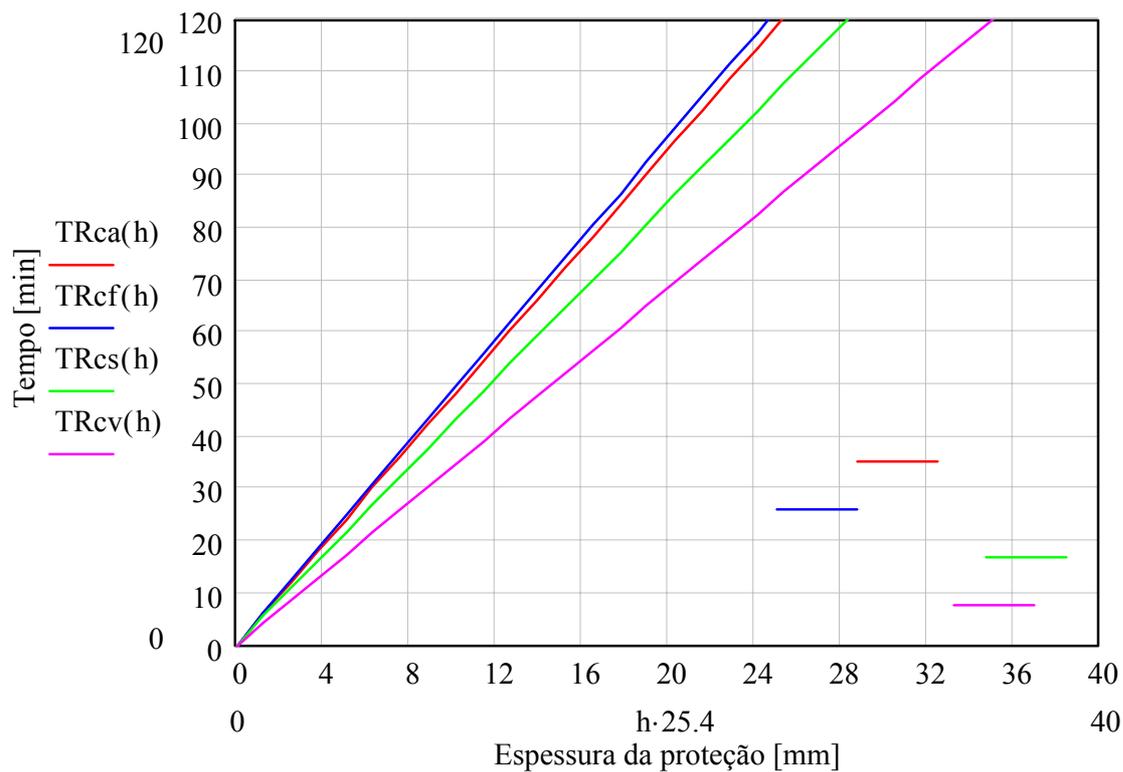


Figura 8-9 – Tempo que a estrutura de perfil em I leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Materiais aplicados na forma de spray

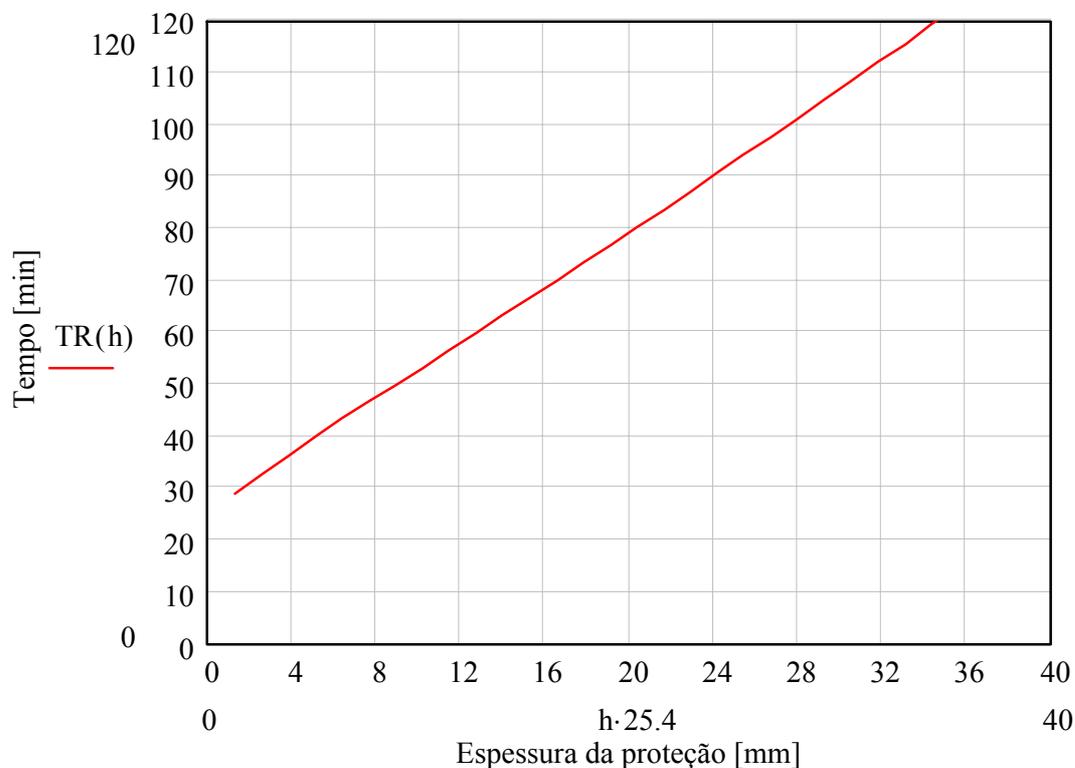


Figura 8-10 – Tempo que a estrutura de perfil cilíndrico leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Recobrimento com concreto – Proteção tipo contorno

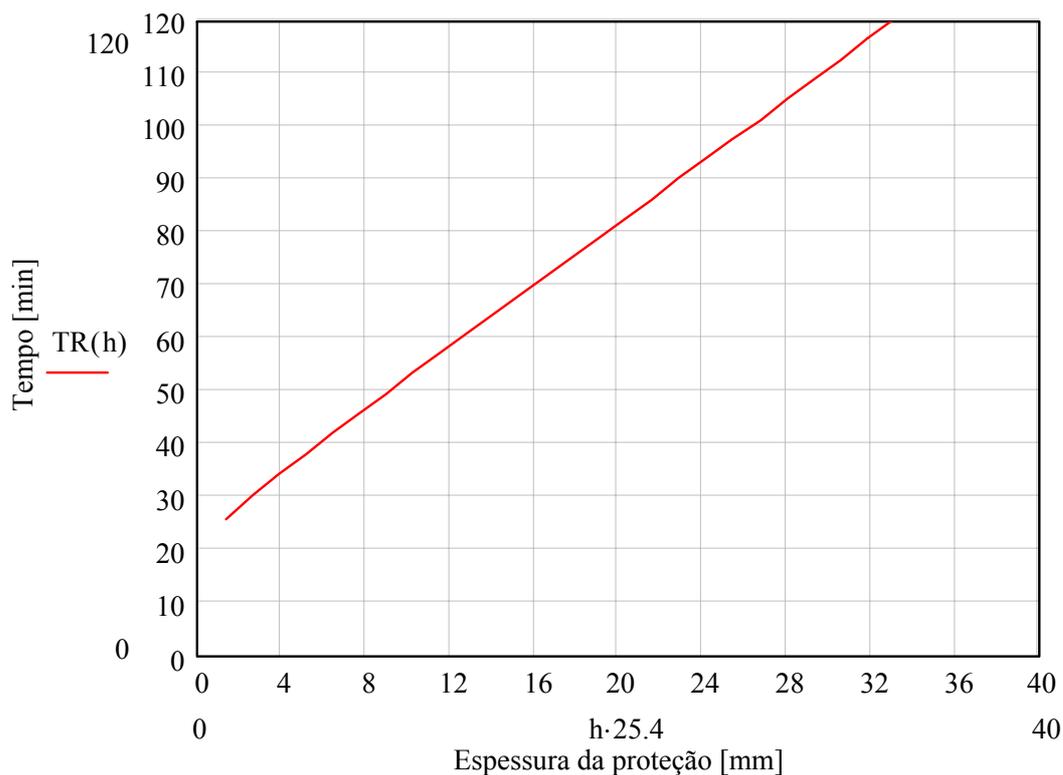


Figura 8-11 – Tempo que a estrutura de perfil cilíndrico leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Recobrimento com concreto – Proteção tipo caixa

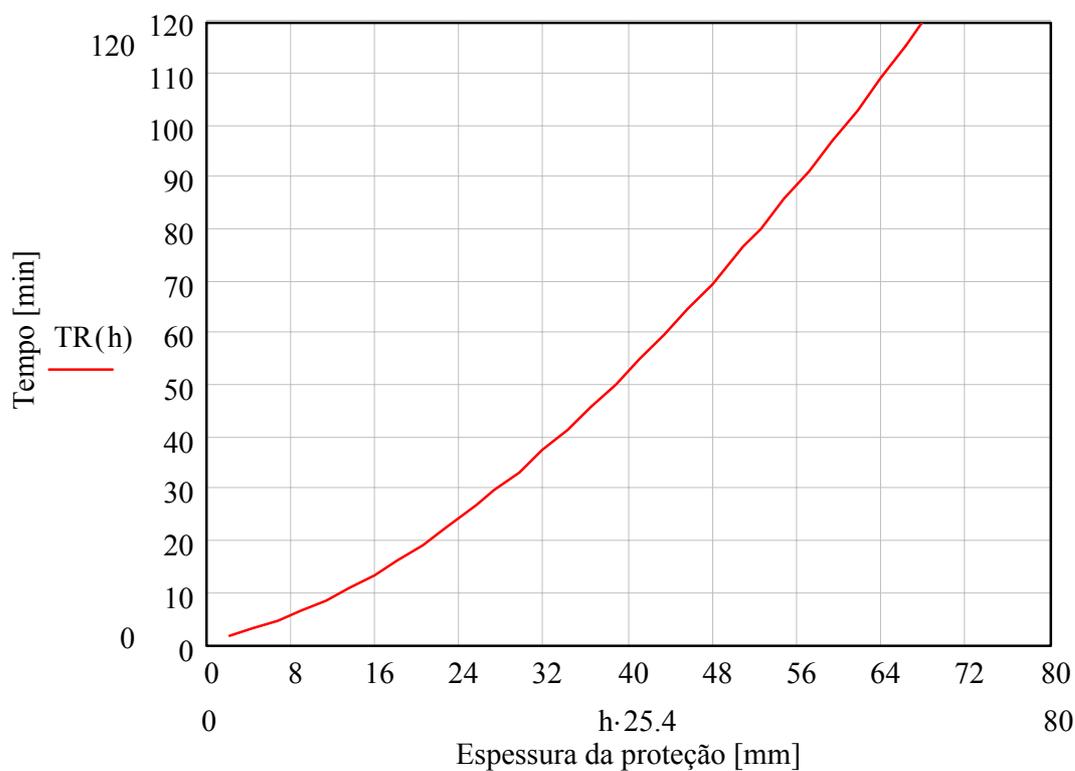


Figura 8-12 – Tempo que a estrutura de perfil retangular leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Recobrimento com concreto – Proteção tipo contorno

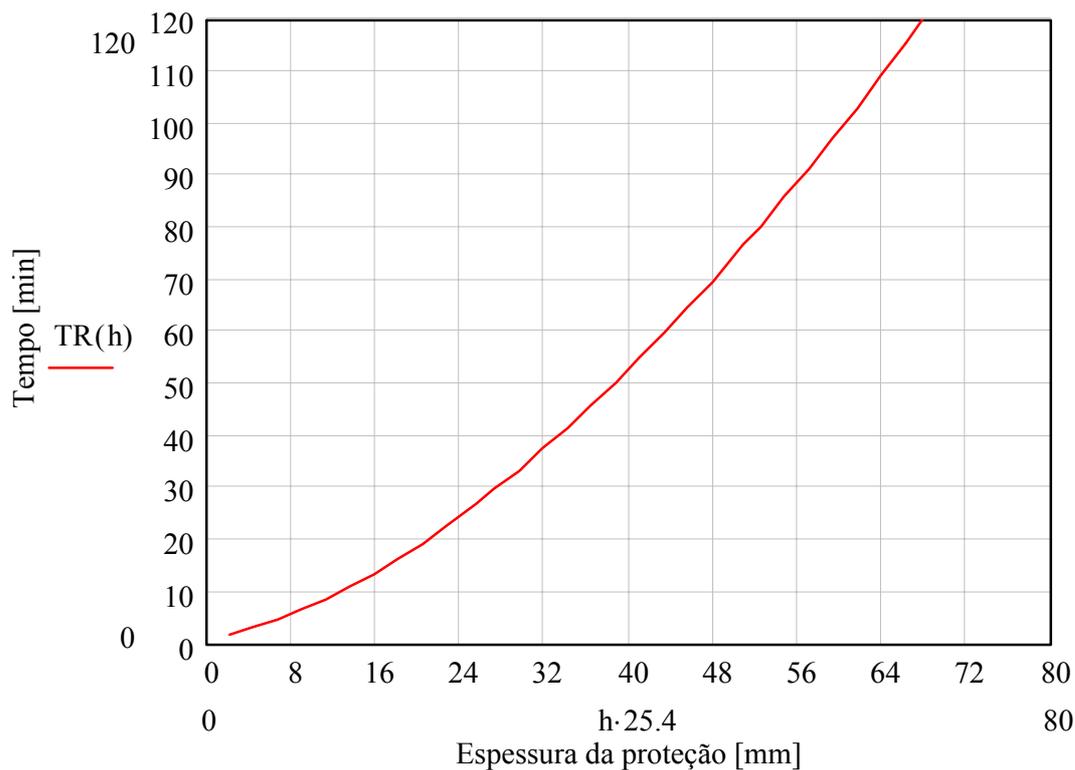


Figura 8-13 – Tempo que a estrutura de perfil retangular leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Recobrimento com concreto – Proteção tipo caixa

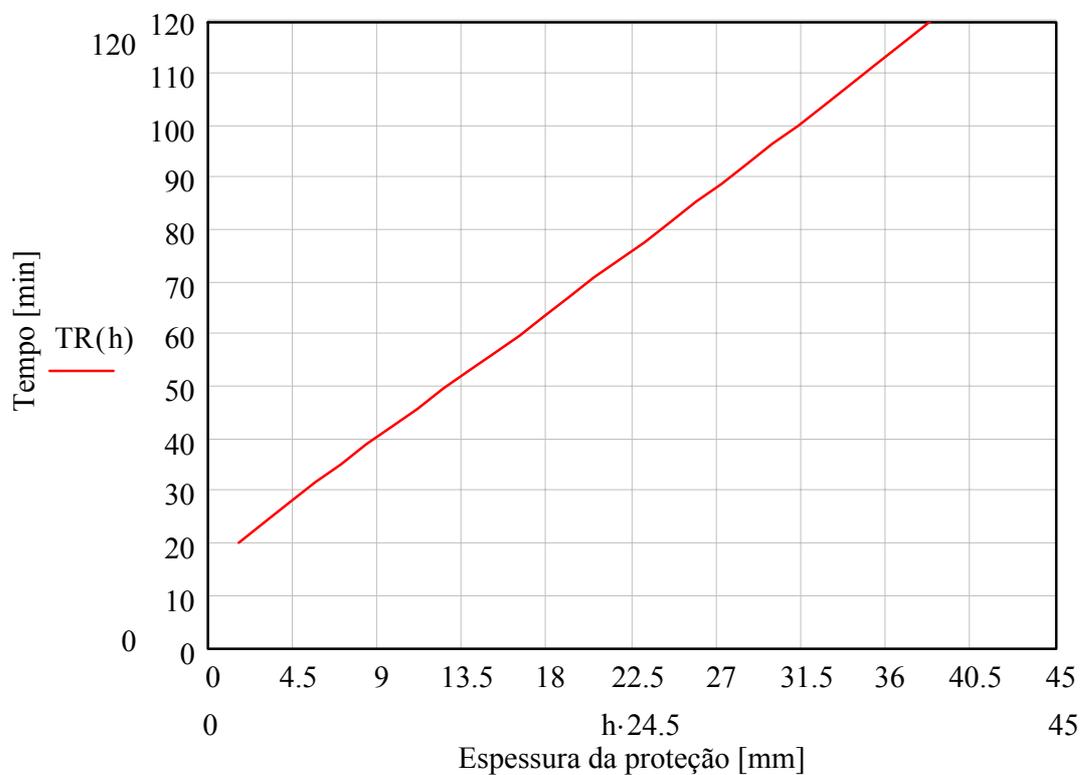


Figura 8-14 – Tempo que a estrutura de perfil em I leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Recobrimento com concreto – Proteção tipo contorno

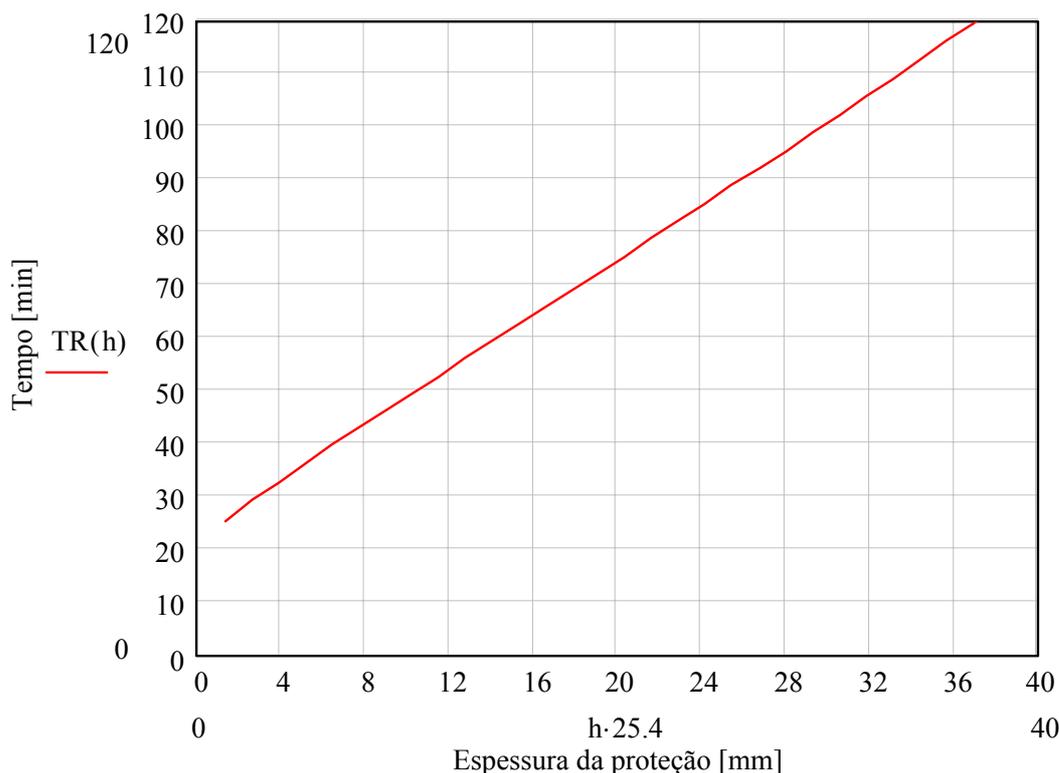


Figura 8-15 – Tempo que a estrutura de perfil em I leva para atingir 550°C versus espessura da proteção – Recobrimento com concreto – Proteção tipo caixa

Comparando-se as figuras 8.4, 8.5 e 8.6, pode-se dizer a respeito de isolamento térmico utilizando placas de gesso, que para uma mesma espessura arbitrária de placa de 0,4 in, o tempo até que a estrutura atinja 550°C, é o maior para o perfil em I e o menor para perfis retangulares. De posse deste fato, pode-se concluir que, a princípio, este tipo de proteção é mais adequado para perfis em forma de I.

Analisando-se as figuras 8.7, 8.8 e 8.9, que apresentam a relação entre o tempo requerido e a espessura da proteção passiva para diversos materiais aplicados na forma de *spray* para perfis circulares, retangulares e em forma de I, é possível afirmar que o material que requer uma espessura menor dependerá da forma da estrutura. Ou seja:

- Para os perfis cilíndricos, a argamassa projetada proporciona um maior tempo até que a temperatura seja igual a crítica para uma mesma espessura de proteção; os materiais de fibras minerais vem em segundo lugar, após estão as fibras minerais reforçadas com silicato de sódio e, por último, vermiculita com silicato de sódio.
- Para os perfis retangulares, os materiais de fibras minerais proporcionam um maior tempo até que a temperatura seja igual a crítica para uma mesma espessura de proteção; a argamassa projetada vem em segundo lugar, após está a vermiculita com silicato de sódio e, por último, as fibras minerais reforçadas com silicato de sódio.

- Para os perfis em I, os materiais de fibras minerais proporcionam um maior tempo até que a temperatura seja igual a crítica para uma mesma espessura de proteção; a argamassa projetada vem em segundo lugar, após estão as fibras minerais reforçadas com silicato de sódio e, por último, a vermiculita com silicato de sódio.

Das figuras 8.10, 8.12 e 8.14 e das figuras 8.11, 8.13 e 8.15, pode-se dizer que o isolamento térmico utilizando recobrimento de concreto, respectivamente, para proteção do tipo contorno e do tipo caixa, que para uma mesma espessura arbitrária de placa de 25,4 mm, o tempo até que a estrutura atinja 550°C, é o maior para o perfil cilíndrico e o menor para perfis retangulares. De posse deste fato, pode-se concluir que, a princípio, este tipo de proteção é mais adequado para perfis cilíndricos. Ou seja, com menor emprego de material consegue-se um maior tempo de proteção.

Na tabela 8.3 a seguir estão apresentados os resultados do dimensionamento da proteção passiva para cada material de proteção disponível usando o método numérico proposto para perfis cilíndricos com diâmetro de 0,1524 m e espessura de parede de 0,0254 m. Na figura 8.16 a seguir está apresentado o perfil de temperatura na interface da estrutura cilíndrica metálica com a argamassa projetada de 16 mm como material de proteção em função do tempo de exposição a chama direta determinados usando o método numérico proposto. Para um tempo de exposição ao fogo de 120 minutos ( $n = 15000$ ), vê-se que a temperatura na interface do perfil cilíndrico metálico e o material de proteção é de, aproximadamente, 546°C.

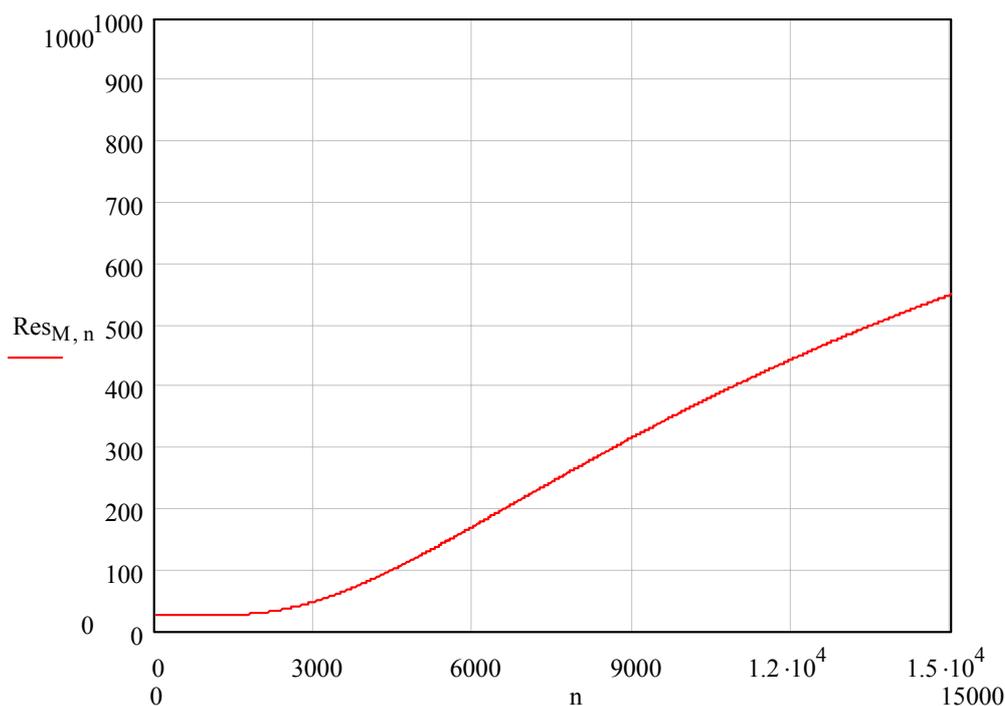


Figura 8-16 – Perfil de temperatura em função do tempo para perfil cilíndrico protegido com uma camada de 16 mm de argamassa projetada usando o método numérico onde o tempo, em

$$\text{minutos, é dado por } \frac{0.48 \cdot n}{60}$$

Um procedimento similar pode ser empregado para outros materiais de proteção passiva contra incêndio como fibras minerais, concreto e outros. Este método numérico que utiliza a equação da difusão do calor para se determinar o perfil de temperatura no interior de sólidos, pode ser modificado com objetivo de ser resolvida para qualquer perfil estrutural como retangular, perfil em I, perfil em H, entre outros.

Tabela 8-3 – Avaliação da espessura da proteção passiva, para alguns materiais, para que o elemento estrutural atinge a temperatura de 550°C no tempo acima de 120 min por método numérico

Material de proteção	Espessura da proteção térmica [mm]
Argamassa projetada	15,53
Vermiculita com silicato de sódio	22,06
Concreto	38,98

Comparando-se os valores apresentados nas tabelas 8.2 e 8.3, pode-se perceber que o dimensionamento da proteção passiva fazendo-se o uso das correlações empíricas é menos conservativo que para o caso do uso da equação da difusão do calor resolvida por método

numérico. Porém, os resultados apresentados variam, no máximo, em 15% sendo considerado uma diferença dentro dos limites aceitáveis devido aos erros embutidos dentro de cada método utilizado para o dimensionamento da espessura da proteção passiva. Além disso, as correlações são mais fáceis de serem empregadas por requerem cálculos matemáticos elementares. A grande desvantagem do uso das correlações empíricas está na determinação correta do parâmetro  $W$  – massa específica linear do aço.

Com base apenas no aspecto referente ao tempo em que a estrutura leva para atingir a temperatura crítica usando as correlações empíricas:

- seções circulares, o uso de materiais aplicados na forma de *spray* como argamassa projetada seria o material de isolamento mais adequado, ou seja, àquele que proporciona maior tempo para uma mesma espessura de isolamento. Em segundo lugar, outros materiais aplicados na forma de *spray* como fibras minerais, seguidos por fibras minerais reforçadas com silicato de sódio e placas de gesso, e por último, vermiculita com silicato de sódio, recobrimento com concreto com proteção do tipo caixa e do tipo contorno.
- seções retangulares, o uso de materiais aplicados na forma de *spray* como fibras minerais seria o material de isolamento mais adequado, ou seja, àquele que proporciona maior tempo para uma mesma espessura de isolamento. Em segundo lugar, placas de gesso seguidos por outros materiais aplicados na forma de *spray* como argamassa projetada, vermiculita com silicato de sódio e fibras minerais reforçadas com silicato de sódio, e por último, recobrimento com concreto com proteção do tipo caixa e do tipo contorno.
- seções em forma de I, o uso de placas de gesso seria o material de isolamento mais adequado, ou seja, àquele que proporciona maior tempo para uma mesma espessura de isolamento. Em segundo lugar, materiais aplicados na forma de *spray* como fibras minerais, seguidos por argamassa projetada, fibras minerais reforçadas com silicato de sódio e recobrimento com concreto com proteção do tipo caixa, e por último, vermiculita com silicato de sódio, recobrimento com concreto com proteção do contorno.

A tabela 8.4 apresenta as afirmativas acima com respeito a escolha de cada material de isolamento térmico levando em consideração apenas o tempo até que a estrutura atinja a temperatura crítica para uma mesma espessura.

Tabela 8-4 – Comparação entre os materiais de isolamento térmico para as diversas seções com respeito apenas ao tempo, em minutos, até que a estrutura atinja a temperatura crítica para espessura do material de proteção de 25,4 mm

Material de Isolamento		Tempo [min]		
		Seção Circular	Seção Retangular	Seção em forma de I
Placas de Gesso		157,12	38,27	157,85
Materiais aplicados na forma de <i>spray</i>	Argamassa projetada	226,71	34,07	120,44
	Fibras minerais	220,68	44,80	123,67
	Fibras minerais reforçadas com silicato de sódio	204,69	28,80	107,67
	Vermiculita com silicato de sódio	154,80	31,96	87,04
Recobrimento com concreto – tipo contorno		93,98	26,76	81,52
Recobrimento de concreto – tipo caixa		97,52	26,76	88,64

Desta forma, considerando os aspectos de isolamento com referência ao tempo até que a estrutura atinja a temperatura crítica, pode-se, através da tabela 8.4 e das figuras apresentadas, concluir que para estruturas com seções circular, retangular e na forma de I, o material mais indicado, respectivamente para cada um dos perfis, é argamassa projetada, fibras minerais aplicadas na forma de *spray* e placas de gesso.

Porém, a escolha de um material para proteção térmica não deve somente levar em consideração o aspecto do tempo. Assim, o método de aplicação destes materiais é bastante importante, pois as características de cada um destes mecanismos podem influenciar na escolha. Há métodos mais simples e outros mais complexos que podem dificultar o procedimento.

Levando em consideração os aspectos de aplicação do isolamento e, sobretudo, manutenção da proteção e da estrutura em questão, pode-se dizer que, as placas de gesso são mais adequadas no uso em seções retangulares. Isto porque as placas de gesso podem envolver a estrutura, no caso as bandejas de cabos elétricos, de forma a minimizar ao uso do espaço físico e ser de melhor aplicação, principalmente numa estrutura já implantada. Cabe ainda mencionar que no caso das bandejas de cabos elétricos, a temperatura crítica para os fios elétricos é de 70°C. Neste caso, a proteção das placas de gesso seria somente para proteger a bandeja de cabos e, o uso de tinta intumescente e mantas refratárias para os próprios fios.

No caso de seções circulares, principalmente de grandes equipamentos, o uso de placas de gesso que podem servir como anteparos podem ser de grande valia. Isto deve ao fato de que, esta solução é de fácil manuseio, implantação e manutenção. E, ainda, porque esta

forma de utilização dos mecanismos de proteção em equipamentos de processo, não poderá afetar as variáveis de processo, caso contrário, inviabilizaria o seu uso.

Para seções na forma de I, pode-se escolher o recobrimento com concreto e materiais aplicados na forma de *spray*, principalmente àqueles com fibras minerais. Sendo que, este último método é de mais fácil aplicação.

Há ainda um outro fator de suma relevância na escolha do isolamento, o custo envolvido na aplicação de cada um destes materiais.

#### **8.4 Resumo**

Neste capítulo, foram apresentados os elementos estruturais para os quais o dimensionamento da proteção passiva foi avaliado. As análises feitas para os casos de haver ou não proteção térmica foram também discutidas neste capítulo usando as correlações empíricas mostradas no capítulo 7 e em cálculos de transferência de calor do ambiente para as estruturas e sistema elétrico. Na seção anterior, fez-se uma análise para a escolha do material de proteção mais adequado para cada caso.

## 9 CONCLUSÕES

Este trabalho foi iniciado com o propósito de estudar uma unidade de craqueamento catalítico de uma refinaria de petróleo com vistas a determinar quais as melhores estratégias para proteção passiva de estruturas e sistemas elétricos contra incêndio.

A escolha de quais as estruturas que deveriam ser protegidas foi realizada a partir da aplicação de modelos de jato de fogo e incêndio em poça para cenários de liberação de material inflamável. Os cenários de acidentes foram definidos com base em discussões como o corpo técnico da unidade composta de engenheiros de processamento e operadores.

Os modelos de jato de fogo e incêndio em poça utilizados para delimitação das áreas vulneráveis foram selecionados entre aqueles que apresentam resultados satisfatórios e que são comumente empregados para cálculo de efeitos físicos para acidentes relacionados a estes eventos. É importante lembrar que as áreas determinadas a partir deste estudo seriam abrangidas por fogo direto, pois este como se pode perceber pelas figuras praticamente toda a unidade é coberta por estas áreas. Portanto, não foi incluída neste trabalho a avaliação dos fluxos térmicos gerados pelo jato de fogo ou pelo incêndio em poça.

O critério de resistência térmica das estruturas foi adotado com base no tempo de duas horas. Ou seja, neste período de tempo a proteção passiva deverá garantir que estruturas e sistemas elétricos não atinjam suas temperaturas críticas específicas (550°C no caso do aço e 70°C para cabos elétricos).

Os métodos utilizados para avaliação da proteção passiva contra incêndio nas estruturas foram as correlações empíricas apresentadas na seção 7.3.1 e a solução numérica da equação da condução do calor para perfis cilíndricos. Da comparação entre estes dois métodos pode-se concluir que o dimensionamento da proteção passiva fazendo o uso das correlações empíricas é menos conservativo que para o caso do uso da equação da difusão do calor resolvida por método numérico. Porém, os resultados diferem dentro de um limite considerado aceitável (em torno de 15%) levando-se em consideração os erros embutidos em cada método de cálculo. Além disso, as correlações empíricas são de mais simples aplicação por possuir apenas operações matemáticas básicas. Por exemplo, usando as correlações empíricas para os perfis cilíndricos de aço (diâmetro de 0,1524 m e espessura de parede de 0,0254 m), a espessura de revestimento estimada com o uso das correlações empíricas necessária para garantir que a temperatura na interface entre os dois materiais não atinja 550°C em duas horas seria de 13,5 mm para argamassa projetada, 19,7 mm para vermiculita com silicato de sódio e 34,5 mm para recobrimento com concreto com proteção do tipo contorno. Fazendo o mesmo cálculo pelo método numérico proposto, os resultados foram de 15,53 mm para argamassa projetada, 22,06

mm para vermiculita com silicato de sódio e 38,98 mm para recobrimento com concreto com proteção do tipo contorno.

Para os perfis retangulares se avaliou somente a parte metálica, ou seja, as bandejas de cabos elétricos. Para a proteção dos próprios cabos elétricos, recomenda-se o uso de tinta intumescente e de mantas refratárias. Além disso, avaliar a possibilidade de alteração do traçado das bandejas de cabos elétricos para locais externos a área de processo em alguns casos é sugerido como forma de tornar mais seguro os procedimentos de emergência em caso de incêndios. Isto se deve ao fato de que estas bandejas contendo os cabos elétricos estão dispostas, em alguns casos, desnecessariamente pelo interior da unidade como em locais onde a central de distribuição de cabos elétricos está localizada ao lado de sistemas de bombeamento de materiais inflamáveis sem qualquer barreira de proteção (uso de painéis de gesso, por exemplo) conforme pode ser observado na figura 3.4.

Com base no que foi até aqui apresentado, pode-se concluir que um sistema passivo bem dimensionado, especificado corretamente e aplicado de acordo com as boas práticas de engenharia é mais eficiente que os sistemas ativos de resfriamento que dependem de vários fatores e/ou variáveis. Dentre os problemas relacionados com o sistema de proteção ativa pode-se citar treinamento de pessoal, manutenção de equipamentos, tubulações e acessórios, esgotamento físico das equipes de combate a emergências, escassez de água e /ou problemas com bombeamento, número de integrantes da brigada de incêndio insuficiente, etc.

No caso de proteção passiva, a probabilidade do sistema não funcionar se restringe a não-conformidades como mal dimensionamento da espessura do isolamento, erro de especificação, aplicação e instalação do material isolante.

Para os novos empreendimentos, os custos de investimento e, principalmente, operacionais da proteção ativa se tornam equivalentes aos custos de algumas unidades de processo de indústrias do petróleo, pois devem ser considerados os custos com pessoal de operação e manutenção, equipamentos, estoque de peças de reposição, entre outros. Segundo Oliveira, 1993, se somados este valor equivale de 6 a 8 vezes o custo de aquisição, montagem e manutenção de um sistema de proteção passiva, sendo que a diferença é mais acentuada em tanques, equipamentos e tubulações que necessitem de isolamento térmico. Isto porque a proteção passiva devido às suas características isolantes e refratárias não necessitará de qualquer outro material para aquele fim, o que representará uma redução substancial nos custos.

Em unidades existentes, que já possuem sistema de proteção ativa, a aplicação gradativa da proteção passiva torna-se interessante, pois, poderá ser percebida a necessidade de

recursos financeiros para a manutenção e operação do sistema de proteção ativa é representativa e constante, o que não ocorre com a proteção passiva.

Como resultado parcial deste trabalho, pode-se determinar a melhor solução técnica para a proteção de equipamentos, estruturas de sustentação e para o sistema elétrico contra fogo nas instalações de uma refinaria. Os resultados desejados incluem a escolha dos materiais de proteção para cada ponto crítico da análise e o dimensionamento da espessura deste material para cada caso analisado. Por exemplo, recomenda-se que para a bandeja de cabos elétricos o material de proteção passiva deverá ser de fácil remoção para proporcionar facilidade de manutenção e acesso, portanto o material deveria ser aplicado na forma de placas ou de mantas de fibras minerais. Já para os próprios cabos elétricos, recomenda-se aplicação de tinta intumescente por fornecer proteção passiva contra incêndio adequada e por requerer espaço mínimo disponível para sua aplicação.

No caso de estruturas metálicas, como colunas de sustentação e bases de equipamentos, recomenda-se o uso de argamassas especiais que servem para proteger estes elementos contra fogo e oferecem resistência e manutenção apropriadas.

## 10 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Abadie, E., 2003. **“Craqueamento Catalítico”**, Universidade Corporativa, Petrobrás.

Birch, A. D., Brown, D. R., Dodson, M. G., Swaffield, F., 1984. “The Structure and Concentration Decay of High Pressure Jets of Natural Gas”, **Combust. Sci. Technol.**, vol. 36, pp. 249-261.

Bird, R.B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N., 1978. **“Fenómenos de Transporte”**, Editorial Reverté, Barcelona

Burgess, D. S., Strasser, A., Grumer, J., 1961. “ Diffusive Burning of Liquid Fuels in Open Trays”, **Fire Res. Abs. and Rev.**, vol. 3, pp.177

Blackmore, D. R., Eyre, J. A., Summers, G. G., 1982. “Dispersion and Combustion Behavior of Gas Clouds Resulting From Large Spillages of LNG on to the Sea”, **Trans. Inst. Mar. Eng.**, 94, paper, 29

Bletzacker, R. W., 1966. **“Effect of Structural Restraint on the Fire Resistance of Protected Steel Beam Floor and Roof Assemblies”**, Ohio University

Blinov, V. I., Khudiakov, G. N., 1957. **“Certain Laws Governing Diffusive Burning of Liquids”**, Academia Nauk, 113, 1094

Brown, L. E., Wesson, H. R., Welker, J. R., 1975. “Predicting LNG Fire Radiation”, **Fire Prev. Sci. Technol.**, 11, 26

Chamberlain, G. A., 1987. “Developments in Design Methods for Predicting Thermal Radiation from Flares”, **Chem. Eng. Res. Des.**, 65, 299

Clay, G. A., Fitzpatrick, R. R. D., Hurst, N. W., Carter, D. A., Crossthaite, P.J., 1988. “Risk Assessment for Installation Where Liquefied Petroleum Gas (LPG) is Stored in Bulk Vessels Above Ground”, **J. Haz. Materials**, 20, 357

Cook, J., Bahrami, Z., Whitehouse, R. J., 1990. “A Comprehensive Program for Calculation of Flame Radiation Levels”, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, vol. 3, pp.150-155.

Craven, A. D., 1972. “Thermal Radiation Hazards from the Ignition of Emergency vents”, **Chemical Process Hazards**, IV, p.7

Crowl, D. A., Louvar, J. F., 1990. **“Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications”**, Englewood cliffs, New Jersey

Cude, A. L., 1974. “Dispersion of Gases Vented to Atmosphere from Relief Valves”, **The Chemical Engineer**, vol. 290, pp. 629-636.

Ghojel, J. I., 1997. “A New Approach to modeling heat transfer in compartment Fires”, **Fire Safety journal**, vol 31, pp. 227-237.

Guidelines for Engineering Design for Process Safety, 1993

Hottel, H. C., 1959. “Certain Laws Governing Diffusive burning of Liquids”, **Fire Res. Abs. And Rev.**, vol. 1 pp. 41

Incropera, F. P., DeWitt, D. P, 1988. “**Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**”, Editora LTC.

Jeanes, D. C., 1980. “**Methods of Calculating Fire Resistance of Steel Structures**”, Engineering Applications of Fire Thecnology Workshop, SFPE, Boston.

Jeanes, D. C., 1984. Technical Report 84-1, **Society of Fire Protection Engineers**, Boston.

Kay, T. R., Kirby, B. R., Preston, R. R., 1996. “Calculation of the Heating Rate of an Unprotected Steel Member in a Standard Fire Resistance Test”, **Fire Safety Journal**, vol 26, pp. 327-350.

Lees, F. P., 1996. “**Loss Prevention in the Process Industries**”, vol. 2, cap. 16

Lie, T. T., Stanzak, W. W., 1973. **Eng. J. Amer. Inst. Steel Const.**

Long, V. D., 1963. “**Estimation of the Extent of Hazard Areas Round a Vent**”, Second Symposium on Chemical Hazards, pp. 6-13.

Malhotra, H. L., 1982. “**Design of Fire Resisting Structures**”, Chapman e Hall.

Milke, J. A.. 1988. “Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Steel Members”, **The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**, First Edition, seção 3, cap. 6, pp.3-88 – 3-111.

McGuire, J. H., Stanzak, W. W., Law, M. **Fire Tech.**, vol. 11, pp. 3.

Moodie, K., Ewan, B. C., 1990. “Jets Discharging to Atmosphere”, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, vol. 3, pp.68-76.

Mudan, K. S., Croce, P. A. 1984. “Thermal Radiation Model for LNG Trench Fires”, **Am. Soc. Mech. Eng.**, Winter Ann. Mtg, New York

Mudan, K. S., Croce, P. A. 1988. “Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires”, **The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**, First Edition, Section 2, cap. 4, pp.2-45 – 2-87.

Oliveira, M. P., 1993. “**Sistema de Proteção Passiva Contra Incêndio para Indústria de Petróleo e Petroquímica**”, 10º Seminário de Segurança Industrial, São Paulo.

Özişik, M. N.,1980. “**Heat Conduction**”, John Wiley & Sons.

Özişik, M. N., 1994. **“Finite Difference Methods in Heat Transfer”**, CRC Press.

PABCO, Pabco Super Firetemp Fireproofing Board Fire Protection Guide, PABCO, Ruston, Louisiana.

Rasbach, D.J, Rogowski, Z. E., Stark, G. W. V., 1956. “Properties of Fires in Liquids”, **Fuel**, 35, 94

Ricou, F. P., Spalding, D. B, 1961. “Measurements of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets”, **Journal of Fluid Mechanics**, vol. 11, pp. 21-32.

Silva, P. T., 1986. **“Materiais para Equipamentos de Processo”**, Editora Interciência, Rio de Janeiro.

Silva, V. P., 2001. **“Estruturas de Aço em Situação de Incêndio”**, Editora Zigurate, São Paulo.

Stanzak, W. W., Lie, T. T., 1973. **“Fire Tests on Protected Steel Columns with Different Cross-Sections”**, National Research Council of Canada, Ottawa.

Thomas, P. H., 1963. **“The Size of Flames from Natural Fires”**, 9<sup>th</sup> International Combustion Symposium, Pittsburgh, pp. 844-859.

Welker, J. R., Sliepcevich, C. M., 1967. **“Wind Interaction Effects on Free Burning Fires”**, Tech. Report #1441-3 to Office of civil Defense of U. S. Bureau of Standards.