

GLÁUCIA ADRIANE DE SOUSA SULZBACH

ANÁLISE TÉRMICA DE PERFIL METÁLICO EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Brasil

Balsas-MA, 2018

GLÁUCIA ADRIANE DE SOUSA SULZBACH

ANÁLISE TÉRMICA DE PERFIL METÁLICO EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Monografia, submetido à Coordenação de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos necessários para obtenção Título de Bacharel em Engenharia Civil.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

CAMPUS BALSAS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Orientador: Prof^a. Ma. Gislane Pinho de Oliveira

Coorientador: Prof. Me. Denis Fabrício Sousa de Sá

Brasil

Balsas-MA, 2018

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

de Sousa Sulzbach, Gláucia Adriane.

ANÁLISE TÉRMICA DE PERFIL METÁLICO EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO / Gláucia Adriane de Sousa Sulzbach. - 2018.
81 f.

Coorientador(a): Denis Fabrício Sousa de Sá.

Orientador(a): Gislane Pinho de Oliveira Pinho de
Oliveira.

Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do
Maranhão, Balsas/MA, 2018.

1. Aço. 2. Diferenças Finitas. 3. Incêndio. 4.
Software. I. Pinho de Oliveira, Gislane Pinho de
Oliveira. II. Sousa de Sá, Denis Fabrício. III. Título.

GLÁUCIA ADRIANE DE SOUSA SULZBACH

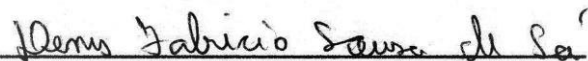
ANÁLISE TÉRMICA DE PERFIL METÁLICO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Monografia, submetido à Coordenação de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos necessários para obtenção Título de Bacharel em Engenharia Civil.

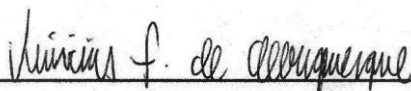
Trabalho aprovado. Brasil, Balsas/MA, 10 de dezembro de 2018:



Prof.^a. Ma. Gislane Pinho de Oliveira

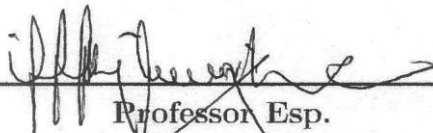


Prof. Me. Denis Fabrício Sousa de Sá



Professor Me.

Vinícius Farias Albuquerque



Professor Esp.

Willame Braga Lima

Brasil

Balsas-MA, 2018

Dedico esse trabalho à minha família, que sempre contribuiu muito com a minha bagagem de conhecimentos. Eles foram responsáveis pela maior herança da minha vida: meus estudos.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter realizado o sonho de cursar a faculdade de Engenharia Civil e por todo aprendizado de vida ao longo desses cinco anos.

Assim como a semente se transforma em árvore, sem perceber, nossa mudança acontece de dentro pra fora e nesse período de minha vida, o meu amadurecimento acadêmico, profissional e pessoal deu-se através da colaboração e ensinamentos de várias pessoas que, direta ou indiretamente, agregaram valor à pessoa que me tornei.

Agradeço aos meus pais Vander e Lourilda, por sempre batalharem para que eu conseguisse realizar o sonho de cursar a faculdade e nunca deixaram faltar amor, carinho, paciência e ensinamentos na minha criação. Ao meu irmão Augusto Guilherme, por toda cumplicidade ao longo da vida e aos meus familiares estarem comigo em todos os momentos.

Meus agradecimentos ao meu esposo, co-orientador e companheiro de vida Denis Fabrício, pelo apoio e incentivo aos estudos e por compartilhar comigo meus sonhos, que hoje se tornaram nossos.

À minha orientadora Gislane Pinho pelos ensinamentos, paciência e dedicação em sala de aula e na elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus professores, por repassarem seus conhecimentos e pelo incentivo a buscar sempre mais, ao corpo de funcionários da Universidade Federal do Maranhão - Campus Balsas e aos que me deram a oportunidade de ter experiência profissional fora da universidade.

”Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

(Charles Chaplin)

Resumo

O trabalho apresenta a aplicação de equações de distribuição de calor desenvolvidas a partir do método das diferenças finitas em perfis metálicos do tipo “I”, com o intuito de demonstrar a distribuição de calor na peça em situações de incêndio e determinar as perdas de propriedades como a elasticidade e o escoamento do material. Para tal tarefa, foi desenvolvido um software na plataforma de programação MATLAB *license Student* v.2018, denominado “*IFire-Simulation*”, com a finalidade de otimizar os cálculos em situações variadas. A aplicação do método mostrou-se bastante satisfatória, como exemplo de utilização do software foi realizada uma simulação para o caso um galpão industrial de $300m^2$. O software permite ainda que sejam realizados diversos tipos de simulação para o perfil I, funcionando como uma ferramenta fundamental no momento de análises estruturais que consideram a ação do fogo.

Palavras-chave: Incêndio. Aço. Diferenças finitas. Software.

Abstract

The work presents the application of heat distribution equations developed from the finite differences method in “I” metallic profiles, in order to demonstrate the heat distribution in the piece in fire situations and determine the loss of properties such as elasticity and the flow of the material. For this task, a software was developed in the MATLAB Student license, v.2018, called “IFire-Simulation”, in order to optimize the calculations in varied situations. The application of the method proved to be quite satisfactory, as an example of software utilization a simulation was performed in the case of an industrial shed of $300m^2$. The software also allows several types of simulation to be performed for the “I” profile, functioning as a fundamental tool in the moment of structural analysis that considers the fire action.

Keywords: Fire. Steel. Finite differences. Software.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Volume de controle diferencial	25
Figura 2 – Coeficiente de dilatação térmica do aço em função da temperatura . . .	28
Figura 3 – Calor específico do aço em função da temperatura	29
Figura 4 – Condutividade térmica do aço em função da temperatura	30
Figura 5 – Rede nodal em regime bidimensional	33
Figura 6 – Condução de calor para um nó interior	34
Figura 7 – Condução de calor para um nó interior através dos pontos adjacentes .	35
Figura 8 – Superfície plana com convecção	36
Figura 9 – Superfície plana com convecção	37
Figura 10 – Pontos nodais considerados para o desenvolvimento das equações . . .	38
Figura 11 – Curva temperatura-tempo em um incêndio real	41
Figura 12 – Demonstração cálculo de áreas	45
Figura 13 – Modelo Incêndio Padrão	46
Figura 14 – Modelo Incêndio Natural	46
Figura 15 – Critério de estabilidade	53
Figura 16 – Diagrama lógico do sistema de simulação	58
Figura 17 – Tela inicial do <i>IFire- Simulation</i>	59
Figura 18 – Dimensões do perfil metálico	60
Figura 19 – Representação em 2D do perfil	60
Figura 20 – Configuração da influência do incêndio em cada face	61
Figura 21 – Configuração do incêndio padrão	62
Figura 22 – Configuração do Uso/ Ocupação	62
Figura 23 – Configuração do incêndio natural	63
Figura 24 – Configuração da carga específica de incêndio	63
Figura 25 – Galpão modelo	65
Figura 26 – Dimensões perfil I	65
Figura 27 – Curva Incêndio Padrão	67
Figura 28 – Distribuição de temperatura no Perfil I em 5min - Inc. Padrão	68
Figura 29 – Distribuição de temperatura no Perfil I em 20min - Inc. Padrão	68
Figura 30 – Distribuição de temperatura no Perfil I em 61min - Inc. Padrão	69
Figura 31 – Fator de redução da elasticidade - Inc. Padrão	70
Figura 32 – Fator de redução do escoamento - Inc. Padrão	71
Figura 33 – Coeficiente de dilatação- Inc. Padrão	72
Figura 34 – Curva Incêndio Natural	72
Figura 35 – Distribuição de temperatura no Perfil I em 5min- Inc. Natural	73
Figura 36 – Distribuição de temperatura no Perfil I em 20min- Inc. Natural	73

Figura 37 – Distribuição de temperatura no Perfil I em 80min - Inc. Natural	74
Figura 38 – Fator de redução da elasticidade - Inc. Natural	75
Figura 39 – Fator de redução do escoamento - Inc. Natural	76
Figura 40 – Coeficiente de dilatação - Inc. Natural	76

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores do coeficiente de redução do Módulo de Elasticidade	31
Tabela 2 – Valores do coeficiente de redução Limite de Escoamento	32
Tabela 3 – Coeficientes de segurança	43
Tabela 4 – Valor coeficiente γ_{s1}	43
Tabela 5 – Valor coeficiente γ_{s2}	43
Tabela 6 – Valor coeficiente K	44
Tabela 7 – Tempo limite mínimo de incêndio	47
Tabela 8 – Cargas de incêndio específicas	48
Tabela 9 – Potencial calorífico específico	49

Lista de símbolos

q_x	Taxa de transferência de calor em x
q_y	Taxa de transferência de calor em y
q_z	Taxa de transferência de calor em z
q_n''	Fluxo de calor em x
q_x''	Fluxo de calor em x
q_y''	Fluxo de calor em y
q_z''	Fluxo de calor em z
q_{cv}''	Fluxo de calor por convecção
ΔT	Variação da temperatura
Δx	Variação do espaço
h	Coefficiente de transmissão de calor por convecção
θ_m	Temperatura do meio θ_m
θ_s	Temperatura da superfície
q_r	Taxa de calor radioativo
σ	Constante de Stefan-Boltzman
A	Área
θ	Temperatura
ε	Emissividade
θ_1	Temperatura no corpo 1
θ_2	Temperatura no corpo 2
k	Condutividade térmica
ρ	Densidade
c_p	Calor específico
α	Difusividade térmica

E_{acu}	Energia acumulada
E_{ent}	Energia que entra no sistema
E_{sai}	Energia acumulada que sai do sistema
E_g	Energia térmica gerada pelo sistema
l_a	Comprimento da peça
Δl_a	Expansão da peça provocada pela temperatura
θ_a	Temperatura do aço
E	Módulo de elasticidade do aço
E_θ	Módulo de elasticidade do aço a uma temperatura θ_a
$k_{E,\theta}$	Coefficiente de redução do módulo de elasticidade do aço
$f_{y,\theta}$	Limite de escoamento do aço à uma temperatura θ_a
f_y	Limite de escoamento do aço à uma temperatura ambiente
$k_{E,\theta}$	Coefficiente de redução do limite de escoamento do aço
T_∞	Temperatura proveniente da convecção no ambiente
$T_{m+1,n}$	Temperatura no nó à direita
$T_{m-1,n}$	Temperatura no nó à esquerda
$T_{m,n+1}$	Temperatura no nó superior
$T_{m,n-1}$	Temperatura no nó inferior
$T_{m,n}$	Temperatura no nó central
T^p	Temperatura no instante anterior
T^{p+1}	Temperatura no tempo futuro
F_o	Número de Fourier
B_i	Número de Biot
t_e	Tempo equivalente
$q_{fi,k}$	Valor característico da carga de incêndio
y_n	Coefficiente que leva em consideração a presença de medidas de proteção ativa

y_s	Coefficiente de segurança que depende do risco de incêndio e das consequências do colapso da edificação
M	Fator de ajuste do tempo equivalente às características do material estrutural
K	Fator relacionado às características térmicas do material de vedação
W	Fator relativo à ventilação do ambiente
H	Altura
A_v	Área de ventilação vertical
A_h	Área de ventilação horizontal
A_f	Área de piso
A_t	Área total das superfícies internas do compartimento excluindo as aberturas
w_v	Largura abertura vertical
w_h	Largura abertura horizontal
h_v	Altura abertura vertical
h_h	Altura abertura horizontal
w_1	Largura da parede que possui a maior área de janela
w_2	Largura da parede perpendicular à w_1
b	Absortividade térmica

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivos Gerais	18
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.2	Metodologia	19
2	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	21
2.1	Transferência por condução	21
2.2	Transferência por convecção	22
2.3	Transferência por radiação	23
2.4	Propriedades Térmicas da Matéria	23
2.5	Equação do calor	24
3	PROPRIEDADES DO AÇO	27
3.1	Coefficiente de dilatação térmica	27
3.2	Calor Específico	28
3.3	Condutividade Térmica	29
3.4	Módulo de elasticidade do aço	30
3.5	Fator de escoamento do aço	31
4	MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS	33
4.1	Método do Balanço de Energia	34
4.2	Discretização da Equação do Calor: Método Explícito	37
5	CARACTERIZAÇÃO DO INCÊNDIO	41
5.1	Incêndio Padrão	42
5.2	Incêndio Natural	46
5.2.1	Tempo da temperatura máxima nos gases	46
5.2.2	Curva do ramo ascendente	49
5.2.3	Curva do ramo descendente	50
6	SOFTWARE IFIRE-SIMULATION	52
6.1	Critério de estabilidade	52
6.2	Desenvolvimento dos Algoritmos	53
6.2.1	Algoritmo para o Perfil I, por diferença finitas	53
6.2.2	Algoritmo do Incêndio Padrão	54
6.2.3	Algoritmo do Incêndio Natural	55

6.3	Desenvolvimento lógico	57
6.4	Utilizando o programa	58
7	ANÁLISE TÉRMICA DO PERFIL I	65
7.1	Dados da Simulação	65
7.2	Resultados da Simulação	67
7.2.1	Resultados da Simulação- Incêndio Padrão	67
7.2.2	Resultados da Simulação- Incêndio Natural	72
7.2.3	Comparativo dos resultados	76
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
8.1	Conclusão	79
8.2	Trabalhos Futuros	80
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Observando a história da humanidade nota-se que o uso de materiais para melhorar e facilitar a vida do homem já data desde as mais remotas civilizações. O marco inicial desse processo deu-se com a confecção de objetos e ferramentas de pedra lascada com o intuito de servirem como apetrechos para a caça. Posteriormente, com a descoberta do fogo e da possibilidade de sua utilização para modelar o aço, o homem passou a ter armas mais trabalhadas e evoluiu esta técnica para modelagem de outros utensílios (BOEIRA, 2007). Anos depois, tais descobertas viabilizaram o uso do aço em larga escala para as mais diversas finalidades, como utensílios de cozinha, trilhos de trem, estruturas metálicas para construção civil, entre outras aplicações que impulsionaram o acontecimento da revolução industrial.

Foi a partir da curiosidade e das descobertas sobre como trabalhar com diferentes tipos de materiais que a engenharia de materiais conhecida hoje se desenvolveu. A definição mais atual do termo está ligada à geração e aplicação dos conhecimentos que relacionem composição, estrutura e processamento dos materiais às suas propriedades e usos (COHEN, 1997). Este tema está sujeito a um grande enfoque pela indústria, que busca desenvolver materiais cada vez mais eficientes com custos competitivos no mercado.

No que tange a construção civil, é recorrente a utilização de muitos recursos materiais para conceber projetos, logo, é de fundamental importância para o profissional de engenharia o conhecimento sobre as propriedades dos produtos com que trabalha, uma vez que diante de situações adversas é necessário ter uma concepção aproximada sobre o seu comportamento.

Os materiais metálicos especificamente possuem um destaque especial em peças estruturais devido sua alta resistência mecânica associada à esbeltez (FERRAZ, 2005), o que lhe confere uma boa aceitação na indústria da construção civil principalmente para finalidades estruturais. Diante da sua elevada importância a nível estrutural torna-se importante saber como o aço se comporta em situações extremas, como no caso de um incêndio, para que seja garantida a segurança da edificação e de seus habitantes.

Alguns casos de incêndio em estruturas metálicas, trazem à tona que critérios de segurança devem ser analisados e bem adotados para evitar tragédias. O exemplo mais recente de incêndio em edificações com estruturas metálicas é o Edifício Wilton Paes de Almeida, no centro de São Paulo, que sofreu um incêndio no dia 1 de maio de 2018 e entrou em colapso em menos de uma hora e meia, dificultando as operações de resgate e deixando muitas vítimas no local (BBC, 2018).

Os principais objetivos da segurança contra incêndio são minimizar os eventuais

riscos à vida e reduzir as perdas patrimoniais passíveis de acontecerem nessa situação. Para ser considerada segura nesse quesito, a estrutura deve resistir a esforços solicitantes em elevadas temperaturas para evitar colapsos.

Existem normas brasileiras que delimitam as diretrizes necessárias para segurança das estruturas metálicas em situação de incêndio, como a NBR 14323 que trata do dimensionamento de estrutura de aço e estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio (ABNT, 2003), e a NBR 14432 que trata das exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações (ABNT, 2001a). Essas normas utilizam critérios gerais para a análise térmica das peças metálicas, todavia, quando se deseja uma visualização mais detalhada é necessário realizar uma análise térmica a fundo sobre o desenvolvimento e a distribuição da temperatura na peça.

A análise térmica de perfis metálicos em situação de incêndio neste trabalho é feita através do método numérico das diferenças finitas, muito usado na obtenção da solução de equações diferenciais parciais, por transformar sua resolução em um sistema de equações algébricas, substituindo as derivadas por aproximações utilizando apenas valores numéricos da função.

O trabalho apresenta o desenvolvimento de um software na plataforma MATLAB[®] capaz de modelar o desenvolvimento da temperatura em um perfil metálico I durante uma situação de incêndio. Dentre as abrangências que ele possui, está a possibilidade do usuário personalizar a sua análise com base no incêndio padrão ou no incêndio natural, conforme os critérios disponíveis na norma europeia e nas normas brasileiras. Para realizar esta tarefa é implementado o método das diferenças finitas na análise da distribuição de calor na peça, através do método da capacitância global. A partir dessas informações o software determina a evolução da temperatura na peça durante o incêndio, além de analisar a influência da temperatura em propriedades fundamentais do material como a dilatação térmica, o módulo de elasticidade e o escoamento.

1.1 Objetivos

Nesta seção são mostrados os objetivos geral e específicos almejados no trabalho.

1.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo alvo do trabalho é aplicar as equações de distribuição de calor em um perfil metálico I em situação de incêndio, utilizando o método das diferenças finitas, além de desenvolver um software na plataforma de programação MATLAB *license Student* v.2018, para otimizar os cálculos em situações variadas, como as de incêndio padrão e natural, com o intuito de servir de apoio para estudos futuros sobre estruturas em situação de incêndio.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Estudar as bibliografias referentes ao tema;
2. Desenvolver as equações de transmissão de calor para o perfil metálico I através do método das diferenças finitas;
3. Desenvolver um software na plataforma MATLAB para fazer a análise térmica do perfil metálico sob condições de incêndio padrão e natural;
4. Analisar a dilatação térmica da peça;
5. Analisar a redução de propriedades como a elasticidade e o escoamento;
6. Servir de apoio para desenvolvimento de trabalhos futuros na área de estruturas em situação de incêndio.

1.2 Metodologia

A primeira etapa do trabalho consiste no estudo sobre a transmissão de calor e na montagem das equações diferenciais, buscando a base para tal processo na metodologia empregada na obra de o INCROPERA et al. (2008).

Sucessivamente, foi analisada a influência do incêndio no perfil metálico I e adaptadas as equações de transferência de calor necessárias para aplicação nos diferentes pontos do perfil.

Desenvolvidas as equações de calor, deu-se início à elaboração do software, envolvendo o conceito de diferença finitas desenvolvido na plataforma MATLAB[®] *license Student* v.2018. O perfil foi construído de forma matricial, onde o algoritmo tem por finalidade percorrê-lo, atualizando a temperatura em cada ponto de acordo com a evolução temporal do incêndio.

O próximo passo foi implementar ao software a simulação de incêndio padrão e natural. Para definição do incêndio padrão tomou-se por base a norma brasileira NBR 5628, que trata dos componentes construtivos estruturais e da resistência ao fogo (ABNT, 2001b), onde é encontrado o procedimento de cálculo e, de forma complementar, foi implementada a rotina de cálculo para determinação do tempo equivalente. Posteriormente, foi implementado o incêndio natural baseado na norma europeia que trata de estruturas expostas ao fogo (CEN, 2002), visto que as normas brasileiras não indicam o procedimento de cálculo para tal situação. As cargas de incêndio por uso/ocupação e específicas para o incêndio natural foram implementadas de acordo com a ABNT (2001a).

Após a determinação do comportamento do incêndio foi calculada a transferência de calor para a peça de acordo o CEN (2002). A última determinação foi das alterações em

propriedades da peça com o aumento da temperatura como a . dilatação e a condutividade térmica, e a redução no fator de escoamento e no módulo de elasticidade. Sendo as duas últimas propriedades citadas analisadas conforme a norma europeia EUROCÓDIGO 3, denominada “Projetos de estruturas de aço, Parte 1-2: Regras gerais - Verificação da resistência ao fogo” (CEN, 2010).

2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transmissão de calor consiste na energia térmica em trânsito decorrente da diferença de temperatura no espaço. Essa transmissão pode ocorrer através da condução, convecção ou radiação.

2.1 Transferência por condução

Para entender o processo de condução pode-se imaginar um material constituído de várias partículas, que em uma determinada região apresenta temperaturas mais elevadas, logo, admite-se que as partículas localizadas nesse ponto terão maior agitação e, conseqüentemente, irão transmitir gradativamente a agitação para as partículas vizinhas sem abandonar sua posição inicial e gerando transferência de calor pelo corpo (MARTINS, 2000). Matematicamente, este processo pode ser demonstrado pelas Equações (2.1) até (2.4), (INCROPERA et al., 2008).

$$q_x = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}. \quad (2.1)$$

Sendo:

q_x = taxa de transferência de calor (W/m^2);

A = área da seção atravessada pelo calor (m^2);

ΔT = variação de temperatura ($^{\circ}C$);

Δx = percurso (m);

k = condutividade térmica do material ($W/m^{\circ}C$).

Devido ao fato do calor ser sempre transferido no sentido da diminuição das temperaturas, é necessário inserir o sinal negativo na expressão. Submetendo a Equação (2.1) ao limite, para $\Delta x \rightarrow 0$, obtém-se a taxa de transferência de calor dada pela Equação (2.2):

$$q_x = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (2.2)$$

Dividindo a taxa pela área pode-se demonstrar o fluxo de calor:

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (2.3)$$

Reconhecendo o fluxo térmico como uma grandeza vetorial tem-se o fluxo de calor em sua forma tridimensional, dado por:

$$q'' = -k\nabla T = -k \left(\hat{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (2.4)$$

Pode-se então calcular o fluxo térmico em uma ou mais direções conforme as Equações (2.5), (2.6), (2.7) e (2.8):

$$q_n'' = \hat{i}q_x'' + \hat{j}q_y'' + \hat{k}q_z'', \quad (2.5)$$

$$q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.6)$$

$$q_y'' = -k \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2.7)$$

$$q_z'' = -k \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (2.8)$$

Essas expressões relacionam o fluxo térmico através de uma superfície ao gradiente de temperatura em uma direção perpendicular a ela, descrevendo a Lei de Fourier, aplicada a toda matéria independentemente de seu estado físico. Nesse processo, considera-se o meio através do qual ocorre a condução como sendo isotrópico, no qual o valor da condutividade térmica independente da direção da coordenada (INCROPERA et al., 2008).

2.2 Transferência por convecção

Outro fenômeno relacionado à transferência de calor é a convecção, que acontece quando um fluido escoar nas imediações de um corpo, sob a condição de que ambos estejam a diferentes temperaturas. Ela pode ser natural, quando o movimento do fluido é causado por diferenças de densidade entre regiões distintas do mesmo, ou forçada, quando induzida por agentes mecânicos, como bombas ou ventiladores.

A definição do fluxo de calor por convecção está relacionada ao coeficiente de transmissão de calor por convecção $h(W/m^2\text{ }^\circ C)$, a área de contato entre o fluido e o corpo A , e a diferença entre as temperaturas do meio (θ_m) e da superfície (θ_s), explícita na Equação (2.9) (MARTINS, 2000).

$$q_{cv} = hA(\theta_m - \theta_s). \quad (2.9)$$

2.3 Transferência por radiação

A radiação por sua vez se trata da energia transmitida pelas ondas eletromagnéticas, sendo mais eficiente no vácuo, pois em um meio material ao ser atravessada implica na dissipação de energia. Segundo (MARTINS, 2000), o metal polido no interior de uma edificação com condições normais se comporta como mal emissor e absorvedor de energia. A taxa de calor emitido por um irradiador perfeito é dado pela Equação (2.10):

$$q_r = \sigma A(\theta + 273)^4. \quad (2.10)$$

Sendo:

q_r = taxa de calor radioativo;

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($5.669 \cdot 10^{-8} W/m^2 C^4$);

A = área de superfície do irradiador ideal (m^2);

θ = temperatura do irradiador ($^{\circ}C$).

Para o caso em que ha troca de calor entre dois corpos reais utiliza-se a Equação (2.11),

$$q_r = \sigma \cdot A \cdot \varepsilon \cdot \left((\theta_1 + 273)^4 - (\theta_2 + 273)^4 \right), \quad (2.11)$$

sendo ε a emissividade e θ_1 e θ_2 as temperaturas nos dois corpos.

2.4 Propriedades Térmicas da Matéria

Dentre as propriedades dos materiais mais relevantes para o estudo da transmissão de calor está a condutividade térmica, que está intimamente ligada à estrutura física, atômica e molecular da matéria. Ela é definida pela Equação (2.12), tomando por base a Lei de Fourier apresentada na seção anterior.

$$k_x = - \left(\frac{q_x}{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)} \right). \quad (2.12)$$

Existem ainda outras propriedades relevantes, como as termodinâmicas, dentre elas podem ser citadas a densidade (ρ) e o calor específico (c_p). O produto dessas duas propriedades resulta na chamada capacidade calorífica volumétrica, dada em $J/(m^3.K)$, capaz de medir a capacidade que um material possui para armazenar energia térmica. Sólidos e líquidos são considerados bons armazenadores de energia.

As propriedades já apresentadas anteriormente quando combinadas resultam em uma importante propriedade para a transferência de calor denominada difusividade térmica, dada pela Equação (2.13) em m^2/s :

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}. \quad (2.13)$$

Quanto mais elevado o valor da difusividade térmica, mais rápido o material responderá às mudanças nas condições térmicas impostas a ele, ou seja, essa propriedade mede a capacidade do material em conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazenamento (INCROPERA et al., 2008).

2.5 Equação do calor

A partir do conhecimento sobre o comportamento das diferentes formas de transmissão de calor pode-se entender melhor o que acontece na primeira Lei da Termodinâmica. Sua ideia fundamental baseia-se no preceito de que em um determinado volume de controle, a taxa de aumento da quantidade de energia térmica e mecânica acumulada deve ser igual à taxa com que essas energias entram no volume de controle, menos a taxa com que elas saem, mais a taxa de energia térmica gerada no interior deste volume Equação (2.11):

$$\Delta E_{acu} = E_{ent} - E_{sai} + E_g. \quad (2.14)$$

Para realizar a análise da difusão do calor em um volume de controle considera-se um meio homogêneo onde a distribuição da temperatura é feita em coordenadas cartesianas $T(x, y, z)$, de onde é estabelecido um volume de controle infinitesimal dx, dy, dz , conforme Figura 1.

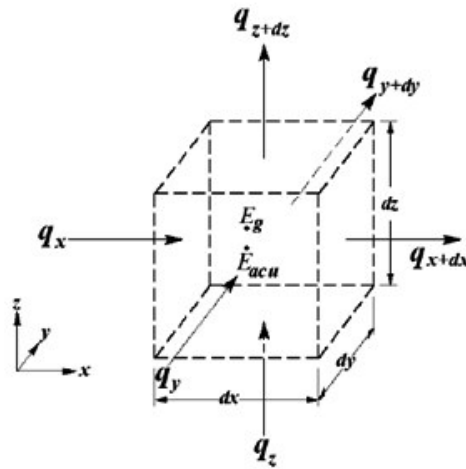
As variáveis q_x, q_y e q_z representam as taxas de calor por condução perpendiculares a cada superfície. Para calcular as taxas de transferência de calor por condução nas superfícies opostas utiliza-se uma expansão em série de Taylor, truncada no segundo termo, dada pelas Equações (2.15), (2.16) e (2.17).

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx. \quad (2.15)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy. \quad (2.16)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz. \quad (2.17)$$

Figura 1 – Volume de controle diferencial



Fonte: (INCROPERA et al., 2008)

Para o nó interior também pode existir um termo de fonte de energia associado à taxa de geração de energia térmica, que pode ser determinado pela Equação (2.18),

$$E_g = q \cdot dx \cdot dy \cdot dz, \quad (2.18)$$

sendo:

q = taxa na qual a energia é gerada por unidade de volume do meio (W/m^3);

E_g = manifestação de algum processo de conversão de energia em calor.

Para obter a taxa de variação de energia no interior do volume de controle utiliza-se a Equação (2.19), que está ligada à taxa de variação com o tempo da energia térmica do meio por unidade de volume.

$$E_{acu} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz. \quad (2.19)$$

Conhecendo o balanço global de energia demonstrado pelo Equação (2.15), pode-se substituir os termos conforme Equação (2.20):

$$q_x + q_y + q_z + q dx dy dz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz. \quad (2.20)$$

Definindo as taxas de transferência de calor pela Lei de Fourier, apresenta-se as Equações (2.21), (2.22) e (2.23):

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.21)$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2.22)$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (2.23)$$

Substituindo na Equação (2.20) e dividindo os termos por $(\partial x, \partial y, \partial z)$, tem-se a equação da difusão do calor, Equação (2.24):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2.24)$$

A primeira parcela desta equação relacionada com o espaço (x, y, z) , é a taxa de transferência de energia por condução para o interior de um volume unitário. A segunda parcela q representa a taxa volumétrica de geração de energia térmica, o último termo após a igualdade trata da taxa de variação da energia térmica acumulada. Todas as fórmulas mostradas nesta subseção são referentes à bibliografia de INCROPERA et al. (2008).

3 PROPRIEDADES DO AÇO

O comportamento de um elemento estrutural diante de altas temperaturas depende de muitas variáveis, dentre elas está a degradação das propriedades sofridas devido a elevação da temperatura (MESQUITA, 2004). A condutividade térmica, o calor específico, o módulo de elasticidade, o escoamento e o coeficiente de dilatação térmica, são exemplos de propriedades que variam durante um incêndio. O peso específico é um parâmetro que não varia significativamente com a temperatura, para o caso do aço seu valor é de $7800\text{kg}/\text{m}^3$.

3.1 Coeficiente de dilatação térmica

Ao ser aquecido o material passa por uma expansão, sendo a dilatação térmica o parâmetro que fornece o percentual de dilatação da peça, compreendida como a razão entre a deformação e a temperatura.

A norma europeia CEN (2010), traz as equações para a variação da extensão térmica em m/m e em função da temperatura:

- Para temperaturas: $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C}$

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 1.2 \cdot 10^{-5} \theta_a + 0.4 \cdot 10^{-8} \theta_a^2 - 2.416 \cdot 10^{-4}. \quad (3.1)$$

- Para temperaturas: $750^\circ\text{C} \leq \theta_a < 860^\circ\text{C}$

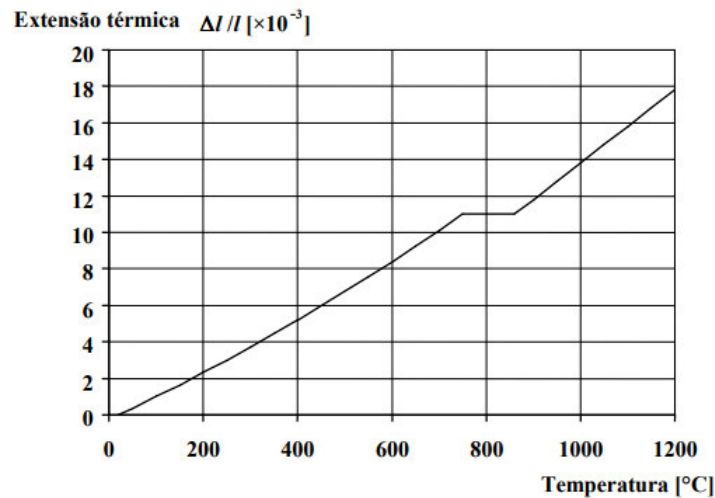
$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 1.1 \cdot 10^{-2}. \quad (3.2)$$

- Para temperaturas: $860^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200^\circ\text{C}$

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 2 \cdot 10^{-5} \theta_a - 6.2 \cdot 10^{-3}. \quad (3.3)$$

Sendo, l_a o comprimento da peça de aço a 20°C , Δl_a a expansão da peça provocada pela temperatura e θ_a a temperatura do aço em Celsius. A Figura 2 mostra como o coeficiente de dilatação térmica do aço varia com a temperatura de acordo com a norma europeia:

Figura 2 – Coeficiente de dilatação térmica do aço em função da temperatura



Fonte: (CEN, 2010)

Conforme ilustrado no gráfico verifica-se que o coeficiente de dilatação térmica sofre um aumento linear até a temperatura de $700^{\circ}C$ de onde atinge um patamar até aproximadamente $900^{\circ}C$, que corresponde ao início da transformação da fase elástica para plástica, acarretando no material uma dilatação de aproximadamente 1% em relação às dimensões iniciais da peça. Após a transformação de fase, ela assume novamente característica linear (MESQUITA, 2004), porém não voltará a ter suas características elásticas.

3.2 Calor Específico

O calor específico define a capacidade do material em armazenar energia, ele é uma das propriedades do aço que mais varia com a temperatura. Conforme descrito em CEN (2010), de forma similar à dilatação térmica, o calor específico em $(J/kg^{\circ}C)$ da peça também varia com a temperatura:

- Para temperaturas: $20^{\circ}C \leq \theta_a < 600^{\circ}C$

$$c_p = 425 + 7.73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1.69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3. \quad (3.4)$$

- Para temperaturas: $600^{\circ}C \leq \theta_a < 735^{\circ}C$

$$c_p = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}. \quad (3.5)$$

- Para temperaturas: $735^{\circ}C \leq \theta_a < 900^{\circ}C$

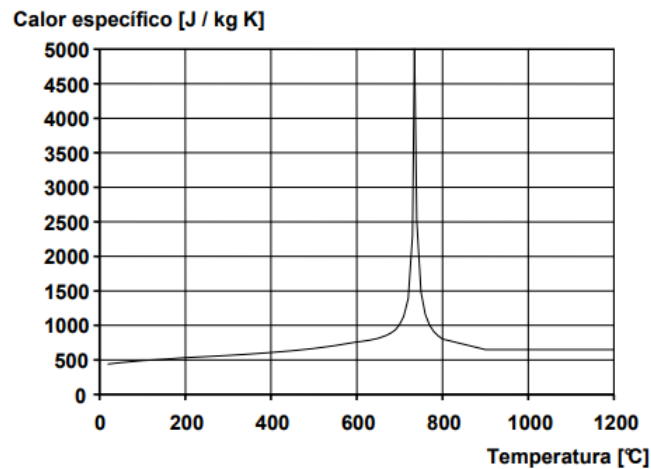
$$c_p = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}. \quad (3.6)$$

- Para temperaturas: $900^{\circ}C \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}C$

$$c_p = 650. \quad (3.7)$$

A Figura 3 mostra a variação do parâmetro com a temperatura, permitindo inferir que próximo a $735^{\circ}C$ ocorre mudança de fase do aço, associando o aumento do calor específico ao calor latente existente na transformação (MESQUITA, 2004).

Figura 3 – Calor específico do aço em função da temperatura



Fonte: (CEN, 2010)

3.3 Condutividade Térmica

Para a condutividade térmica, dada em ($W/m^{\circ}C$), a norma apresenta apenas duas regiões de mudanças:

- Para temperaturas: $20^{\circ}C \leq \theta_a < 800^{\circ}C$

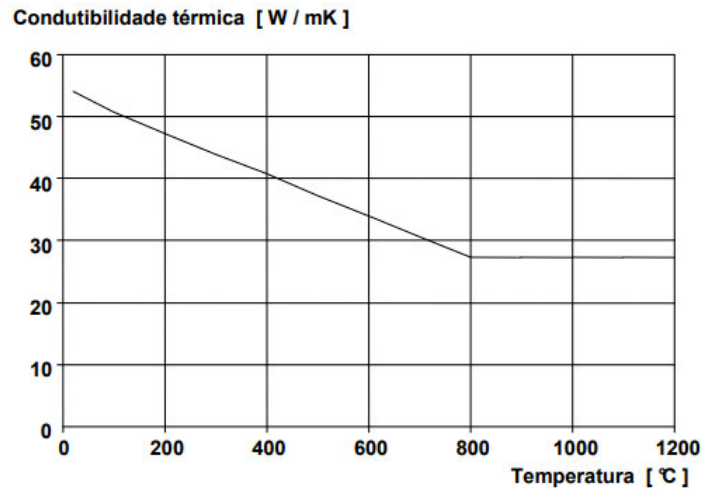
$$k = 54 - 3.33 \cdot 10^{-2} \theta_a. \quad (3.8)$$

- Para temperaturas: $800^{\circ}C \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}C$

$$k = 27.3. \quad (3.9)$$

Tal propriedade diminui com o aumento da temperatura, decrescendo linearmente até $800^{\circ}C$, tornando-se estável em seguida, conforme apresenta a Figura 4.

Figura 4 – Condutividade térmica do aço em função da temperatura



Fonte: (CEN, 2010)

3.4 Módulo de elasticidade do aço

O módulo de elasticidade consiste na relação entre a tensão aplicada em uma peça e a deformação elástica resultante, trazendo à tona a capacidade do material em resistir ao esforço solicitante. A deformação gerada é proporcional à tensão imposta, obedecendo a Lei de Hooke, e o material retorna ao seu estado inicial quando a carga é removida. Sob condições de altas temperaturas o material tende a suportar menos carga no estado elástico, diminuindo o valor do módulo de elasticidade.

Para tornar mais eficiente a segurança da estrutura em situação de incêndio, calcula-se a redução sofrida pelo módulo de elasticidade através de um coeficiente, expresso pela Equação (3.10), conforme MARTINS (2000).

$$k_{E,\theta} = \frac{E_\theta}{E}. \quad (3.10)$$

Sendo:

E_θ = módulo de elasticidade do aço a uma temperatura θ_a ;

E = módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente (20°C).

MESQUITA (2004), traz uma tabela adaptada do CEN (2010), que relaciona a redução do coeficiente do módulo de elasticidade com a temperatura, Tabela 1.

Tabela 1 – Valores do coeficiente de redução do Módulo de Elasticidade

Temperatura [°C]	$k_{E,\theta}$
20	1.0000
100	1.0000
200	0.9000
300	0.8000
400	0.7000
500	0.6000
600	0.3100
700	0.1300
800	0.0900
900	0.0675
1000	0.0450
1100	0.0225
1200	0.0000

Fonte: (CEN, 2010), adaptado por (MESQUITA, 2004)

Pode-se observar que o coeficiente que pondera a elasticidade do material diminui com o aumento da temperatura e varia de maneira pouco significativa quando a temperatura atinge valores elevados. Conforme MESQUITA (2004), os valores de $k_{E,\theta}$ obtidos na tabela podem ser substituídos pelo resultado calculado da equação:

$$k_{E,\theta} = \frac{1.1 - 0.001\theta_a}{e^{(\theta_a-500)} + 1} + 220 \frac{e^{(-0.006\theta_a-3)}}{e^{(\theta_a-500)} + 1} \leq 1.0, \quad (3.11)$$

sendo θ_a a temperatura do aço.

3.5 Fator de escoamento do aço

Visando a segurança global das estruturas, os projetos são dimensionados para que os materiais trabalhem apenas em regime elástico, visto que, na deformação plástica o material não retorna às suas características iniciais que precedem a aplicação da tensão quando a mesma é cessada. O mesmo princípio é tomado para situações de incêndio, onde é importante garantir que a peça suporte o máximo possível de tempo até atingir o limite de escoamento, que é justamente o ponto de onde se inicia a deformação plástica. Esse estudo é importante para que seja garantido o tempo mínimo de estabilidade estrutural necessária para a evacuação de pessoas do local, além de permitir que sejam tomadas medidas para controlar o fogo antes que a estrutura seja danificada e acarrete perdas materiais.

Assim como para o módulo de elasticidade, o limite de escoamento também possui um fator de redução para situação de incêndio demonstrado pela Equação (3.12):

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}, \quad (3.12)$$

sendo:

$f_{y,\theta}$ = limite de escoamento à uma temperatura θ_a ;

f_y = limite de escoamento do aço à temperatura ambiente ($20^\circ C$).

Conforme adaptação feita por MESQUITA (2004) de uma tabela do CEN (2010), observa-se a relação do fator de redução do limite de escoamento com a temperatura:

Tabela 2 – Valores do coeficiente de redução Limite de Escoamento

Temperatura [°C]	$k_{y,\theta}$
20	1.00
100	1.00
200	1.00
300	1.00
400	1.00
500	0.78
600	0.47
700	0.23
800	0.11
900	0.06
1000	0.04
1100	0.02
1200	0.00

Fonte: (CEN, 2010), adaptado por (MESQUITA, 2004)

Os valores obtidos na Tabela 2 podem ser substituídos pelo resultado obtido através da equação (MESQUITA, 2004):

$$k_{y,\theta} = [0.9674(e^{\frac{\theta_a - 482}{39.19}} + 1)]^{\frac{-1}{3.833}} \leq 1.0. \quad (3.13)$$

Quando a peça atingir a perda total de capacidade de escoamento ela irá se romper, por não suportar mais deformações impostas.

4 MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

Interpretar matematicamente os fenômenos da natureza, estudando suas características e elaborando hipóteses é de grande valia para os estudos científicos, uma vez que promove a criação do modelo matemático que traz equações e descreve uma noção bem da realidade. Tal processo é denominado modelagem matemática (SOUSA, 2009).

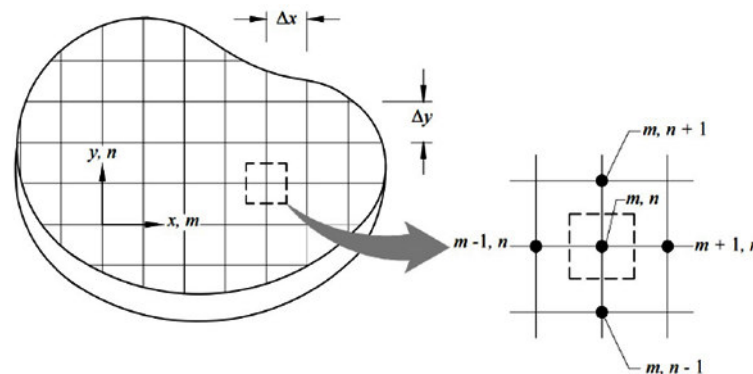
Muitos modelos matemáticos de equações diferenciais parciais não possuem soluções analíticas, para resolvê-los é necessário utilizar métodos numéricos que aproximem a condição para soluções mais próximas à realidade. O método das diferenças finitas é uma proposta bastante útil e eficaz na resolução de casos em diversos campos de estudo, e se baseia na informação sobre como a taxa de uma grandeza varia em um ponto definido (GILAT; SUBRAMANIAM, 2008).

A expressão da forma de diferenças finitas da derivada $f'(x)$ e $f(x)$ em um ponto, definida pela Equação (4.1), é equivalente à inclinação da reta tangente à curva nesse ponto.

$$\frac{df(x)}{dx} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}. \quad (4.1)$$

Para esta análise, o volume de controle considerado é dividido em pequenas regiões onde fica estabelecido um ponto de referência fixado no centro, denominado ponto nodal ou nó, o aglomerado destes é chamado de rede ou malha nodal, Figura 5. Esses pontos possuem alta influência na exatidão numérica.

Figura 5 – Rede nodal em regime bidimensional



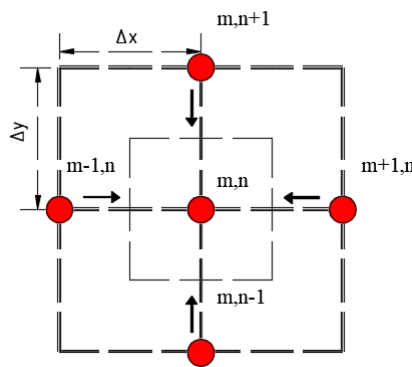
Fonte: (INCROPERA et al., 2008)

4.1 Método do Balanço de Energia

Quando se trata de problemas envolvendo o calor é perspicaz desenvolver as equações de diferenças finitas através do método de balanço de energia. Neste caso, aplica-se ao ponto nodal a conservação de energia em superfícies de controle adjacentes à região, e considera-se que os fluxos térmicos são sempre orientados para o interior do nó, uma vez que a real orientação do fluxo térmico é desconhecida (INCROPERA et al., 2008).

O processo de condução de calor para o ponto nodal acontece conforme a Figura 6, que traduz de forma ilustrativa a subtração entre a temperatura do nó e a temperatura do nó vizinho, representando a suposição da direção do fluxo térmico para o centro do nó.

Figura 6 – Condução de calor para um nó interior



Fonte: Autor

Considerando a transferência de calor nas direções x e y , a quantidade de energia transferida do nó $m + 1, n$ para o nó m, n , pode ser descrita pela Equação (4.2), sendo $(\Delta y \cdot w)$ a área de transferência de calor, e $(T_{m+1,n} - T_{m,n})$ a aproximação por diferenças finitas do gradiente de temperatura entre dois pontos nodais. Sendo w a descrição para designar a análise tridimensional, o que não é o objeto de estudo deste trabalho, sendo assim adota-se $w = 1$.

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y \cdot w) \left(\frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \right). \quad (4.2)$$

Fazendo o mesmo procedimento para todos os pontos têm-se as Equações (4.3), (4.4) e (4.5):

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y \cdot w) \left(\frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \right), \quad (4.3)$$

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x \cdot w) \left(\frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \right), \quad (4.4)$$

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x \cdot w) \left(\frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \right). \quad (4.5)$$

Para este caso é considerado que $\Delta x = \Delta y$ e o regime é permanente, o que de acordo com a Equação (2.14) do balanço de energia faz com que $\Delta E_{acus} = 0$. Isso significa que não há geração de calor no interior do volume de controle, fazendo com que todos os fluxos sejam orientados para o centro do volume, portanto, soma-se a influência de cada nó adjacente, obtendo-se:

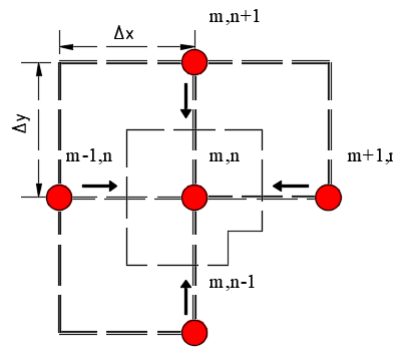
$$kw(T_{m+1,n} - T_{m,n}) + kw(T_{m-1,n} - T_{m,n}) + kw(T_{m,n+1} - T_{m,n}) + kw(T_{m,n-1} - T_{m,n}) = 0. \quad (4.6)$$

Considerando o valor da condutividade térmica constante em todas as direções, a equação assume o seguinte modelo:

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 4T_{m,n} = 0. \quad (4.7)$$

Para o caso de um ponto nodal interior em vértice com convecção, Figura 7, seguem as equações:

Figura 7 – Condução de calor para um nó interior através dos pontos adjacentes



Fonte: Autor

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k\left(\frac{\Delta y}{2} \cdot w\right) \left(\frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \right), \quad (4.8)$$

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y \cdot w) \left(\frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \right), \quad (4.9)$$

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x \cdot w) \left(\frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \right), \quad (4.10)$$

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k\left(\frac{\Delta x}{2} \cdot w\right) \left(\frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \right). \quad (4.11)$$

Como a região também é influenciada pelo calor de convecção deve-se adicionar essa variável ao balanço de energia:

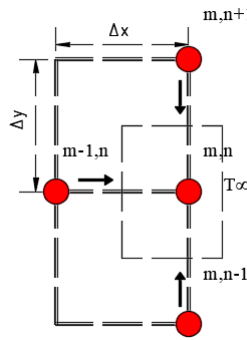
$$q_{\infty \rightarrow m,n} = h \left(\frac{\Delta x}{2} w \right) (T_{\infty} - T_{m,n}) + h \left(\frac{\Delta y}{2} \cdot w \right) (T_{\infty} - T_{m,n}), \quad (4.12)$$

sendo h o coeficiente de convecção. Somando-se todas essas equações obtêm-se a equação geral para o caso:

$$2(T_{m-1,n} + T_{m,n+1}) + (T_{m+1,n} - T_{m,n-1}) + 2\frac{h\Delta x}{k}T_{\infty} - 2T_{m,n} \left(3 + \frac{h\Delta x}{k} \right) = 0. \quad (4.13)$$

Para uma superfície plana com convecção, conforme Figura 8, demonstra-se as equações de diferenças finitas:

Figura 8 – Superfície plana com convecção



Fonte: Autor

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot w \right) \left(\frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \right), \quad (4.14)$$

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot w \right) \left(\frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \right), \quad (4.15)$$

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k (\Delta y \cdot w) \left(\frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \right). \quad (4.16)$$

Considerando a convecção:

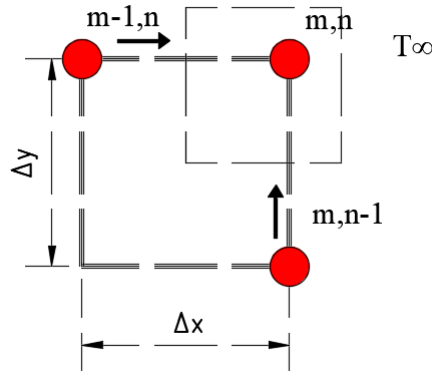
$$q_{\infty \rightarrow m,n} = h (\Delta y \cdot w) (T_{\infty} - T_{m,n}). \quad (4.17)$$

Agrupando todos os termos têm-se:

$$(2T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) + 2\frac{h\Delta x}{k}T_{\infty} - 2T_{m,n} \left(2 + \frac{h\Delta x}{k} \right) = 0. \quad (4.18)$$

Em um vértice externo com convecção conforme demonstrado na Figura 9, é deduzida a equação de transferência de calor:

Figura 9 – Superfície plana com convecção



Fonte: Autor

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot w \right) \left(\frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \right), \quad (4.19)$$

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k \left(\frac{\Delta y}{2} \cdot w \right) \left(\frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \right), \quad (4.20)$$

$$q_{\infty \rightarrow m,n} = h \Delta x (T_{\infty} - T_{m,n}), \quad (4.21)$$

$$(T_{m,n-1} + T_{m-1,n}) + 2 \frac{h \Delta x}{k} T_{\infty} - 2T_{m,n} \left(1 + \frac{h \Delta x}{k} \right) = 0. \quad (4.22)$$

4.2 Discretização da Equação do Calor: Método Explícito

Quando se trabalha com condições transientes de transmissão de calor para casos bi e tridimensionais, a resolução por meio de soluções analíticas ainda são possíveis, porém, muitas vezes a geometria ou outras condições de contorno torna necessário o uso do método de diferenças finitas. Em seu livro sobre transmissão de calor INCROPERA et al. (2008) mostra a equação do calor para um sistema bidimensional sob condição transiente, com propriedades constantes e na ausência de geração interna:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \quad (4.23)$$

Conforme demonstrado na Seção 4.1, pode-se montar a equação de diferenças finitas para o caso transiente e bidimensional, discretizando o problema no espaço e no tempo e introduzindo o inteiro p , Equação (4.24):

$$t = p \Delta t, \quad (4.24)$$

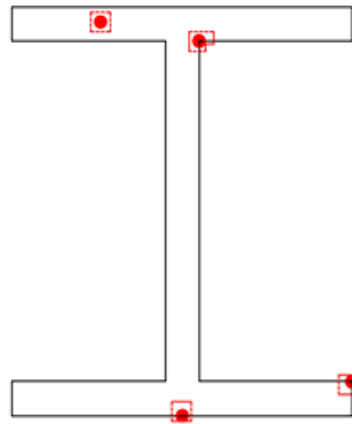
e relacionando com a derivada em relação ao tempo tem-se:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{m,n} \approx \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t}. \quad (4.25)$$

sendo $p + 1$ e p os indicativos da dependência temporal, demonstrando na equação as diferenças de temperatura entre o tempo futuro e o tempo atual, respectivamente (INCROPERA et al., 2008).

Para o perfil I, especificamente, representado na Figura 10, podem ser identificados quatro tipos de nós, para os quais são apresentadas as equações utilizando o método explícito.

Figura 10 – Pontos nodais considerados para o desenvolvimento das equações



Fonte: Autor

Portanto, considerando $\Delta x = \Delta y$, e a aproximação de derivada segunda por diferenças finitas, obtém-se as equações para as geometrias usuais deste caso, demonstradas a seguir.

A forma explícita da equação de diferenças finitas para um nó interior, representado pela Figura 6, é dada pelas equações:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} = \frac{T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p}{\Delta x^2} + \frac{T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p}{\Delta y^2}, \quad (4.26)$$

$$T_{m,n}^{p+1} = F_o(T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) + (1 - 4F_o)T_{m,n}^p, \quad (4.27)$$

$$F_o = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2}. \quad (4.28)$$

Sendo a Equação (4.28), a forma do número de Fourier para diferenças finitas.

O método explícito não é incondicionalmente estável, portanto, com o decorrer do tempo a evolução da temperatura no nó pode divergir para oscilações instáveis, portanto é necessário introduzir critérios de estabilidade para evitar resultados incoerentes (INCROPERA et al., 2008). Na Equação (4.27), por exemplo, o critério para manter a estabilidade é de que o coeficiente que está acompanhando o nó de interesse no instante anterior deve ser maior ou igual a zero o que resulta na Equação (4.29):

$$F_o \leq \frac{1}{4}. \quad (4.29)$$

Para um nó interno com convecção, a forma explícita, representada pela Figura 7, é dada pela Equação (4.30):

$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{2}{3}F_o(T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + 2T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p + 2B_iT_\infty) + (1 - 4F_o - \frac{4}{3}B_iF_o)T_{m,n}^p, \quad (4.30)$$

sendo o critério de estabilidade dado por:

$$F_o(3 + B_i) \leq \frac{3}{4}, \quad (4.31)$$

sendo B_i , a forma em diferenças finitas do número de Biot, que fornece a relação do fluxo de calor convectivo com o exterior sobre o fluxo difusivo (OLIVEIRA, 2014), dado pela equação:

$$B_i = \frac{h\Delta x}{k}. \quad (4.32)$$

Para um ponto nodal em uma superfície plana com convecção, representado pela Figura 8, têm-se:

$$T_{m,n}^{p+1} = F_o(2T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p + 2B_iT_\infty) + (1 - 4F_o - 2B_iF_o)T_{m,n}^p, \quad (4.33)$$

com critério de estabilidade dado por:

$$F_o(2 + B_i) \leq \frac{1}{2}. \quad (4.34)$$

Já para um ponto nodal em um vértice com convecção, representado pela Figura 9, têm-se:

$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_o(T_{m-1,n}^p + T_{m,n-1}^p + 2B_iT_\infty) + (1 - 4F_o - 4B_iF_o)T_{m,n}^p, \quad (4.35)$$

sendo o critério de estabilidade dado pela Equação (4.36):

$$F_o(1 + B_i) \leq \frac{1}{4}. \quad (4.36)$$

Conhecendo as equações é possível desenvolver o algoritmo para o perfil e analisar a distribuição de temperatura em relação ao tempo na peça, em situações de elevadas temperaturas como no caso de incêndios.

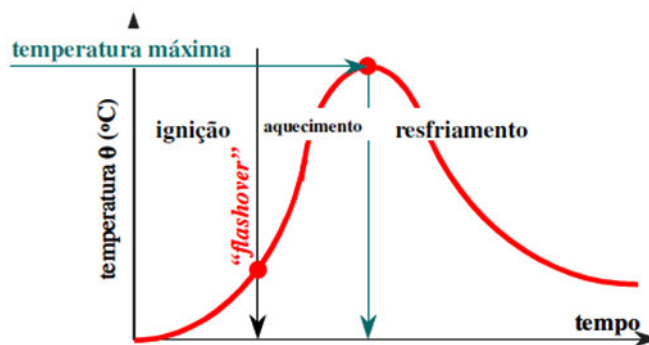
5 CARACTERIZAÇÃO DO INCÊNDIO

Para a análise térmica o incêndio é modelado através de curvas que relacionam o aumento da temperatura e o tempo de duração do incêndio, permitindo que seja estimado o pico de temperatura dos gases presentes no ambiente incendiado (COSTA; SILVA, 2006).

O incêndio real possui três estágios: o da ignição, o do aquecimento e do resfriamento. A fase da ignição corresponde ao início da inflamação, onde a temperatura cresce gradualmente e características como as aberturas no ambiente e o material de compartimentação não exercem influência significativa no processo. Essa fase pode também ser denominada por *pré-flashover*, e termina no instante em que ocorre a inflamação generalizada, o *flashover*. Essa etapa ainda não traz riscos à vida humana e à estrutura (MARTINS, 2000).

Na fase de aquecimento, *flashover*, há um crescimento abrupto da temperatura, e todo material combustível presente no ambiente entra em combustão, ocasionando a elevação da temperatura dos gases até atingirem o pico da curva de incêndio. Após todo material combustível ter sido extinto do ambiente inicia-se a fase de resfriamento, em que os gases começam a apresentar uma diminuição gradativa das temperaturas (COSTA; SILVA, 2006). As fases do incêndio podem ser observadas na Figura 11.

Figura 11 – Curva temperatura-tempo em um incêndio real



Fonte: (COSTA; SILVA, 2006)

No que tange a variabilidade do incêndio pode-se citar alguns fatores que determinarão o seu comportamento, como a carga de incêndio, o grau de ventilação e as características do ambiente. Para fins de análise térmicas ou ensaios existem dois tipos de incêndio que podem ser considerados, são eles o incêndio padrão e o natural. Cabe ressaltar que as curvas paramétricas definidas pela CEN (2002) são baseadas no incêndio natural, válidas para edificações de até $500m^2$ de área de piso e sem aberturas no teto, levando em consideração que todo material inflamável participa do processo de combustão.

5.1 Incêndio Padrão

O incêndio padrão é previsto pela NBR 5628, que em seu escopo aborda a determinação da resistência ao fogo de elementos estruturais (ABNT, 2001b), é definido pela Equação (5.1):

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + T_0, \quad (5.1)$$

sendo T a temperatura do incêndio, T_0 a temperatura ambiente e t o tempo em minutos.

Pela sua simplicidade a curva padrão é a mais adotada, porém as conclusões inferidas sobre os resultados dessa curva devem ser bastante cautelosas, já que não corresponde ao real. Na tentativa de tornar essa curva mais realística usa-se o método do tempo equivalente, que calcula a temperatura no elemento estrutural com base em uma curva padrão para um tempo fictício. A temperatura calculada é a máxima temperatura obtida no elemento, determinada a partir da curva natural (COSTA; SILVA, 2006).

O método do tempo equivalente é calculado utilizando algumas equações da norma europeia CEN (2002), porém possui algumas limitações impostas pela norma brasileira que não permite que o tempo equivalente seja menor que 15 minutos ou inferior ao “Tempo Requerido de Resistência ao Fogo” (ABNT, 2001a). As principais adaptações feitas da norma europeia se referem ao fato do método utilizado pelos pesquisadores brasileiros também considera a área de aberturas no teto e a europeia considera apenas as aberturas nas paredes.

Portanto, o tempo equivalente é calculado conforme COSTA e SILVA (2006), através da Equação (5.2):

$$t_e = q_{fi,k} \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s \cdot K \cdot W \cdot M, \quad (5.2)$$

sendo:

t_e = tempo equivalente (minutos);

$q_{fi,k}$ = valor característico da carga de incêndio (MJ/m^2);

γ_n = coeficiente que leva em consideração a presença de medidas de proteção ativa;

γ_s = coeficiente de segurança que depende do risco de incêndio e das consequências do colapso da edificação;

M = fator de ajuste do tempo equivalente às características do material estrutural, valor adotado=1;

K = relacionado com as características térmicas do material de vedação;

W = fator relativo à ventilação do ambiente.

O coeficiente γ_n é dado pela Equação (5.3), e os valores de cada coeficiente γ_{n1} , γ_{n2} e γ_{n3} são dados pela Tabela 3, adaptada à realidade brasileira por COSTA e SILVA (2005).

$$\gamma_n = \gamma_{n1} \cdot \gamma_{n2} \cdot \gamma_{n3}. \quad (5.3)$$

Tabela 3 – Coeficientes de segurança

γ_{n1}	γ_{n2}		γ_{n3}
Existência de chuveiros automáticos	Brigada contra incêndio		Existência de detecção automática
	Não profissional	Profissional	
0.60	0.90	0.60	0.9

Fonte: Adaptado de COSTA e SILVA (2005)

Na ausência de algum meio de proteção adota-se $\gamma_n = 1$.

O coeficiente γ_s é calculado através da Equação (5.4), e os coeficientes γ_{s1} e γ_{s2} encontram-se nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

$$\gamma_s = \gamma_{s1} \gamma_{s2}. \quad (5.4)$$

Tabela 4 – Valor coeficiente γ_{s1}

Área de piso do compartimento (m ²)	γ_{s1}
25	1.10
250	1.50
2500	1.90
5000	2.00
10000	2.13

Fonte: Adaptado de COSTA e SILVA (2005)

Tabela 5 – Valor coeficiente γ_{s2}

Risco de ativação de incêndio	γ_{s2}
Pequena	0.85
Normal	1.00
Média	1.20
Alta	1.50

Fonte: Adaptado de COSTA e SILVA (2005)

O valor de K está associado às características térmicas dos elementos de vedação, portanto o seu valor é obtido de acordo com a absorvidade do material presente no ambiente, Tabela 6.

Tabela 6 – Valor coeficiente K

Absortividade (b)	$K(\text{min.m}^2/\text{MJ})$
$b > 2500$	0.040
$720 \leq b \leq 2500$	0.055
$b \leq 720$	0.070

Fonte: Adaptado de COSTA e SILVA (2005)

O fator de ventilação é calculado em função da altura do compartimento e das áreas das aberturas, tanto verticais como horizontais, como descreve a equação:

$$W = \left(\frac{6}{H}\right)^{0.3} \cdot \left[0.62 + \frac{90\left(0.4 - \frac{A_v}{A_f}\right)^4}{1 + 12.5\left(1 + 10\frac{A_v}{A_f}\right)\frac{A_h}{A_f}}\right] \geq 0.5, \quad (5.5)$$

sendo H altura do compartimento (m), A_v a área de ventilação vertical, que considera as aberturas no teto (m^2), A_h a área de ventilação horizontal que leva em conta aberturas de portas, janelas e similares (m^2) e A_f a área de piso do compartimento analisado (m^2). A Equação 5.5 é baseada no trabalho de COSTA e SILVA (2005), que sugere esse modelo como uma versão brasileira, mais simples e com uma boa precisão, adaptada de CEN (2002).

A área de ventilação vertical (A_v) e de ventilação horizontal (A_h), compartilham o mesmo princípio de formulação demonstrado pelas Equações (5.6) e (5.7). A área de piso (A_f) e a área total das superfícies internas do compartimento excluindo as aberturas (A_t), podem ser calculadas conforme as Equações (5.8) e (5.9), respectivamente, conforme Figura 12.

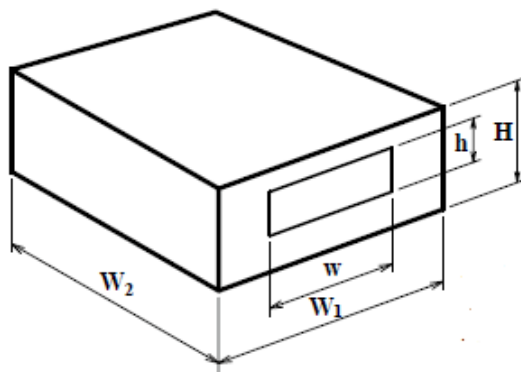
$$A_v = w_v \cdot h_v. \quad (5.6)$$

$$A_h = w_h \cdot h_h. \quad (5.7)$$

$$A_f = w_1 \cdot w_2. \quad (5.8)$$

$$A_t = 2A_f + 2H(w_1 + w_2) - A_v. \quad (5.9)$$

Figura 12 – Demonstração cálculo de áreas



Fonte: (AZEVEDO, 2010)

A absorvidade térmica para o enclausuramento b dado em $J/m^2s^{0.5}C$, é determinada pela Equação (5.10), com ρ sendo a massa específica, c_p o calor específico e k a condutividade térmica (SILVA; MELÃO, 2014).

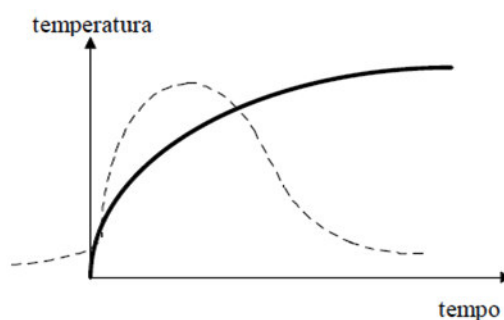
$$b = \sqrt{\rho c_p k}. \quad (5.10)$$

Quando o ambiente possui diferentes materiais de vedação na parede, no piso e no teto, é feita uma média ponderada com os diferentes valores de absorvidade em função das áreas b_{amb} , descontado a área das aberturas, Equação (5.11):

$$b_{amb} = \frac{(A_{parede} - A_h) \cdot (b_{parede}) + (A_{piso}) \cdot (b_{piso}) + (A_{teto} - A_v) \cdot (b_{teto})}{(A_{parede} + A_{piso} + A_{teto} - A_h - A_v)}. \quad (5.11)$$

Por se tratar de uma aproximação da realidade a curva padrão não considera o resfriamento dos gases, ou seja, ela atinge o ponto de temperatura máxima e continua sem decair a temperatura, Figura 13. O tempo equivalente serve justamente para indicar dentro da curva de incêndio padrão a máxima temperatura que o incêndio poderá atingir, de acordo com as características do ambiente.

Figura 13 – Modelo Incêndio Padrão

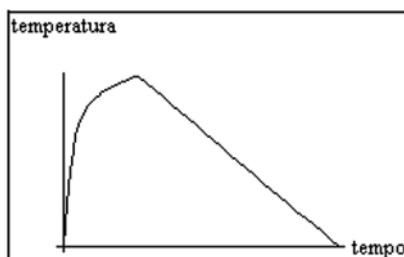


Fonte: (SILVA, 1997)

5.2 Incêndio Natural

A curva temperatura-tempo para o incêndio natural foi construída a partir de ensaios ou modelos matemáticos aferidos a ensaios, simulando desta maneira a situação real de um incêndio em um compartimento. Alguns fatores que influenciam no comportamento da curva são a geometria do ambiente, a ventilação, as características térmicas dos elementos de vedação e a carga de incêndio (AZEVEDO, 2010). Conforme Figura 14, a curva temperatura-tempo do incêndio natural é composta por todos os três estágios de um incêndio real.

Figura 14 – Modelo Incêndio Natural



Fonte: (SILVA, 1997)

5.2.1 Tempo da temperatura máxima nos gases

A primeira determinação a ser feita é a do tempo em que ocorre a máxima temperatura dos gases (t_{max}), obtido através da Equação (5.12):

$$t_{max} = \max \left[\left(\frac{0.0002q_{t,d}}{F_v} \right); t_{lim} \right]. \quad (5.12)$$

O valor do tempo limite mínimo (t_{lim}), é determinado pela velocidade de desenvolvimento do incêndio de acordo com a ocupação do local, conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Tempo limite mínimo de incêndio

Tempo limite mínimo	
Lento (25 min)	Espaço público
Médio (20 min)	Residência, hospital, hotel, escritório, sala de aula
Rápido (15 min)	Biblioteca, shopping, cinema, teatro

Fonte: Adaptado de SILVA e MELÃO (2014)

O fator de ventilação F_v para o incêndio padrão não considera aberturas verticais pois está baseado na norma europeia, portanto é calculado pela Equação (5.13):

$$F_v = \frac{A_h \cdot h_{eq}^{1/2}}{A_t}. \quad (5.13)$$

Os parâmetros da equação são:

A_h = área das aberturas do compartimento (portas, janelas e similares) (m^2);

A_t = área total da superfície interna do compartimento (m^2);

h_{eq} = altura equivalente das aberturas do compartimento (m).

A altura equivalente das aberturas do compartimento é dada pela média ponderada das aberturas:

$$h_{eq} = \frac{\sum (h \cdot A)}{\sum A}, \quad (5.14)$$

sendo:

h = altura de cada abertura do compartimento (m);

A = área de cada abertura do compartimento (m^2).

Para determinar o incêndio natural a carga de incêndio também precisa ser definida, logo o valor de cálculo da carga de incêndio específica relacionada à área total do compartimento $q_{t,d}$, é dada em MJ/m^2 e calculada pela Equação (5.15):

$$q_{t,d} = q_{fd} \frac{A_f}{A_t} (MJ/m^2), \quad (5.15)$$

sendo q_{fd} a carga de incêndio específica (MJ/m^2), A_f a área de piso (m^2) e A_t a área total da superfície interna do compartimento (m^2).

O valor da carga de incêndio é encontrado em ABNT (2001a), dado pelo uso/ocupação ou pela carga de incêndio específica. A Tabela 8 mostra as principais cargas de incêndio previstas na norma.

Tabela 8 – Cargas de incêndio específicas

Valores das cargas de incêndio específicas		
Ocupação/Usos	Descrição	Carga de incêndio MJ/m ²
Residencial	Apartamentos estudantis	300
	Apartamentos	300
	Casas térreas ou sobrados	300
	Pensionatos	300
Serviços de hospedagem	Hotéis	500
	Motéis	500
	Apert-hotéis	300
Comercial varejista	Açougues	40
	Antiguidades	700
	Aparelhos domésticos	500
	Artigos de bijouteria, metal ou vidro	300
	Artigos de couro, borracha, esportivos	800
	Automóveis	200
	Bebidas destiladas	700
	Brinquedos	500
	Cabeleleiro	300
	Calçados	500
	Tintas	800
	Verduras	1000
	Vulcaização	1000
	Livrarias	1000
Drogarias incluindo depósito	1000	
Serviços profissionais, pessoais e técnicos	Consultórios médicos ou odontológicos	200
	Agências bancárias	300
	Copiadora	400
	Encadernadoras	1000
	Escritórios	700
	Oficinas elétricas	600
Educação e cultura física	Academias	300
	Creches	400
	Escolas	300
Locais de reunião pública	Bibliotecas	2000
	Igrejas	200
	Cinemas ou teatros	600
	Museus	300
	Restaurantes	300
Serviços automotivos	Estacionamentos	200
	Oficinas de conserto de veículos	300
Serviços de saúde e institucionais	Asilos	350
	Hospitais	300
Industrial	Padarias	1000
	Produtos de adubo químico	200
	Tintas e solventes	4000
	Massas alimentícias	1000
	Gráficas (empacotamento)	2000
	Laboratórios químicos	500
	Materiais sintéticos ou plásticos	2000
	Metalurgia	200
	Sacos de papel	800
	Roupas	500
	Automotiva e peças (pintura)	500

Fonte: Adaptado de ABNT (2001a)

Para casos específicos de produtos armazenados no interior de uma edificação a norma brasileira ABNT (2001a), proporciona o potencial calorífico específico de alguns materiais, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Potencial calorífico específico

Valores do potencial calorífico específico			
Tipo de material	H MJ/kg	Tipo de material	H MJ/kg
Acrílico	28	Papel	17
Algodão	18	Petróleo	41
Borracha	Espuma-37	Plocarbonato	29
	Tiras-32	Poliéster	31
Couro	19	Polietileno	44
Epóxi	34	Polipropileno	43
Grãos	17	PoliuretanoP	23
Graxa, lubrificante	41	PVC	17
Lã	23	Resina meamínica	18
Lixo de cozinha	18	Seda	19
Madeira	19	Palha	16

Fonte: Adaptado de ABNT (2001a)

Para encontrar a carga de incêndio específica a partir do potencial calorífico específico da substância contida no local, deve-se utilizar a Equação (5.16):

$$q_{fi} = \frac{\sum M_i \cdot H_i}{A_f}, \quad (5.16)$$

sendo:

M_i = massa do material em kg ;

H_i = potencial calorífico específico MJ/kg ;

A_f = área de piso m^2 .

Uma observação importante a ser feita é que quando o tempo em que ocorre a máxima temperatura dos gases é igual ao tempo limite mínimo, Equação 5.12, o incêndio é controlado pelo combustível, e quando $t_{max} > t_{lim}$, o incêndio é controlado pela ventilação (SILVA; MELÃO, 2014). Em termos práticos isso significa que quando o incêndio é controlado pela ventilação a queima de material acontece de maneira mais rápida, ou seja, o incêndio atinge temperaturas mais elevadas em intervalos de tempo mais curtos.

Após realizar a definição desses parâmetros, pode-se elaborar as curvas dos ramos ascendente e descendente do incêndio natural, tema abordado nas seções a seguir.

5.2.2 Curva do ramo ascendente

Cada fase da curva do incêndio natural é regida por uma equação diferenciada, segundo a norma europeia (CEN, 2002), parte 1.2, a equação do ramo ascendente do incêndio é determinada pela Equação (5.17).

$$\theta_g = 1325(1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*}) + \theta_0, \quad (5.17)$$

sendo θ_0 a temperatura dos gases, em $^{\circ}C$, no instante anterior ao início do incêndio e t^* o tempo fictício em horas, dado pela Equação (5.18), quando controlado pela ventilação, e pela Equação (5.19) quando controlado pelo combustível.

$$t^* = t \cdot \Gamma. \quad (5.18)$$

$$t^* = t \cdot \Gamma_{\text{lim}}. \quad (5.19)$$

O parâmetro Γ , fator que contribui para velocidade do avanço do incêndio e depende de fatores como a ventilação e a absorvidade térmica dos materiais presentes no ambiente, é dado pela Equação (5.20).

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{F_v}{0.04}\right)^2}{\left(\frac{b}{1160}\right)^2}. \quad (5.20)$$

O fator de ventilação F_v e a absorvidade térmica b , são calculados da mesma forma que para o incêndio padrão, porém sem considerar a área de ventilação vertical A_v .

Já o coeficiente Γ_{lim} é calculado através da Equação (5.21):

$$\Gamma_{\text{lim}} = j \frac{(F_{v \text{ lim}}/b)^2}{(0.04/1160)^2}, \quad (5.21)$$

de onde $F_{v \text{ lim}}$ representa o grau de ventilação limite determinado pela Equação (5.22) e j é um coeficiente igual a 1, ou calculado por meio da Equação (5.23), caso sejam atendidas as condições de que $F_v > 0,004$, $(q_{t,d}) < 75$ e $b < 1160$.

$$F_{v \text{ lim}} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}}{t_{\text{lim}}}. \quad (5.22)$$

$$j = 1 + \left(\frac{F_v - 0.04}{0.04}\right) \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75}\right) \left(\frac{1160 - b}{1160}\right). \quad (5.23)$$

5.2.3 Curva do ramo descendente

A equação do ramo descendente pode ser assumir três formas distintas, a escolha da formulação correta dependerá do parâmetro t_{max}^* como mostra a Equação (5.24).

$$\begin{cases} \theta_g = \theta_{\text{max}} - 625(t^* - t_{\text{max}}^*x) & \forall \{t_{\text{max}}^* \leq 0.5\} \\ \theta_g = \theta_{\text{max}} - 250(3 - t_{\text{max}}^*)(t^* - t_{\text{max}}^*x) & \forall \{0.5 < t_{\text{max}}^* \leq 2\} \\ \theta_g = \theta_{\text{max}} - 250(t^* - t_{\text{max}}^*x) & \forall \{t_{\text{max}}^* > 2\} \end{cases} \quad (5.24)$$

sendo:

$$\begin{cases} x = 1, & \text{se } t_{\max} > t_{\lim} ; \\ x = \frac{t_{\lim} \cdot \Gamma}{t_{\max}^*}, & \text{se } t_{\max} = t_{\lim} . \end{cases} \quad (5.25)$$

Para o qual t_{\max}^* representa o tempo fictício relativo ao tempo da temperatura máxima dos gases respeitando a condição de ser maior que t_{\lim} , calculado através da Equação (5.26).

$$t_{\max}^* = t_{\max} \cdot \Gamma. \quad (5.26)$$

Definidos os tipos de incêndio e suas características, bem como as equações de diferenças finitas é possível montar os algoritmos necessários para a simular o perfil nas condições desejadas.

6 SOFTWARE IFIRE-SIMULATION

O *software* desenvolvido para a análise térmica do perfil I em situação de incêndio recebeu o nome de “*IFire-Simulation*”. Dentre os recursos disponibilizados está a possibilidade da escolha do usuário sobre o método desejado para realizar a simulação de incêndio, via método padrão ou do incêndio natural, trazendo opções completas para análise das mais diversas situações as quais a peça poderá ser submetida. Como resposta da simulação, o programa fornece dados sobre a temperatura do incêndio, a temperatura na peça, e as mudanças sofridas em propriedades como o coeficiente de dilatação térmica, a elasticidade e o escoamento do aço.

Neste capítulo são apresentados as bases dos algoritmos utilizados para o desenvolvimento do software, o qual se baseia na teoria apresentada na Seção 2 sobre a transmissão de calor, nas propriedades do aço apresentadas na Seção 3, no método das diferenças finitas para calcular a distribuição de temperatura na peça, conforme Seção 4 e, por fim, como fonte térmica o incêndio caracterizado na Seção 5.

A primeira etapa para a elaboração dos algoritmos consiste em analisar os critérios de estabilidade, apresentado a seguir.

6.1 Critério de estabilidade

Com base nas equações de diferenças finitas apresentadas para o perfil I na Seção 4.3, foi encontrada a variação do tempo para adoção do critério de estabilidade sobre o tempo de simulação, com o intuito de adotar a situação mais crítica como o passo de tempo utilizado no desenvolvimento dos algoritmos. Considerando as Equações (4.28) e (4.32) que demonstram a fórmula do número de Fourier (F_o) e Biot (B_i), respectivamente, e substituindo seus valores no critério de estabilidade para cada caso encontrado no perfil, encontrou-se o tempo correspondente para cada situação, mostrado a seguir:

- Critério de estabilidade (Equação (4.28)) do nó interno:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x^2}{4 \alpha}. \quad (6.1)$$

- Critério de estabilidade (Equação (4.31)) do nó interno com convecção:

$$\Delta t \leq \frac{3\Delta x^2}{4 \alpha \left(3 + \frac{h\Delta x}{k}\right)}. \quad (6.2)$$

- Critério de estabilidade superfície plana (Equação (4.34)) com convecção:

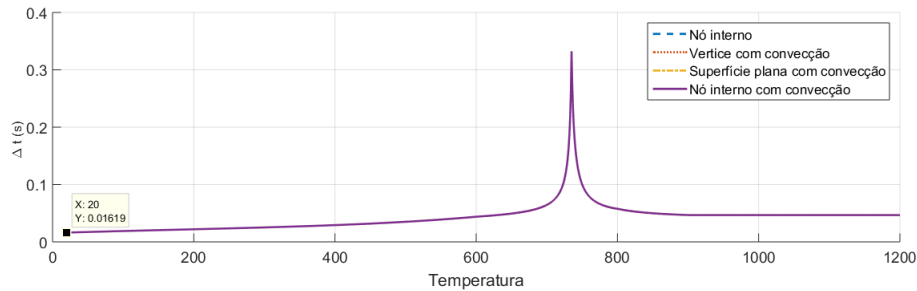
$$\Delta t \leq \frac{\Delta x^2}{4 \alpha}. \quad (6.3)$$

- Critério de estabilidade vértice com convecção (Equação (4.36)):

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x^2}{4 \alpha \left(1 + \frac{h \Delta x}{k}\right)}. \quad (6.4)$$

Para que o algoritmo não se torne instável ao longo do processo de simulação é necessário analisar as Equações (6.1), (6.2), (6.3) e (6.4). Para tanto, foi gerada uma curva para cada umas destas funções, representada na Figura 15.

Figura 15 – Critério de estabilidade



Fonte: Autor

É possível observar que todos os critérios de estabilidade para a faixa de temperatura de 20 a 1200°C foram muito próximos e que o menor passo temporal de simulação deve ser de 0.016s, valor este que varia crescentemente com o aumento de temperatura no perfil. Portanto, para o processo de simulação adota-se 0.016s como passo mínimo de tempo.

6.2 Desenvolvimento dos Algoritmos

Os algoritmos foram desenvolvidos na plataforma MATLAB[®] (*Student License*), 2018. As seções a seguir mostram de maneira simplificada a estrutura dos algoritmos, compreendendo o início do processo com a criação do perfil I, a implementação das equações de calor desenvolvidas através do método das diferenças finitas, o desenvolvimento dos incêndios padrão e natural e, por fim, a alteração nas propriedades térmicas e mecânicas com o aumento da temperatura.

6.2.1 Algoritmo para o Perfil I, por diferença finitas

O perfil é criado através de três matrizes que representam cada uma de suas partes: a mesa inferior, a mesa superior e a alma. A dimensão das matrizes corresponde

à do perfil, que pode ser configurado de acordo com a peça I desejada para a análise. Após a configuração da matriz, insere-se a temperatura ambiente e cada ponto é colocado em temperatura ambiente, correspondendo ao ponto inicial do processo de simulação. Posteriormente, as matrizes são varridas através do uso de laços e são aplicadas a cada ponto do Perfil I as equações de diferenças finitas desenvolvidas na Seção 4. O tempo de inicial adotado foi de 0.016 segundos.

O valor da temperatura do ambiente em chamadas T_∞ , utilizado no algoritmo, é atualizado de acordo com a evolução da temperatura do incêndio no tempo, que pode ser dado pelo incêndio padrão ou natural, de acordo com a escolha do usuário, conforme Algoritmo 1.

Algoritmo 1: APLICAÇÃO DAS DIFERENÇAS FINITAS

Entrada: Dimensões da matriz (X_{dim}, Y_{dim}) , $T_{ambiente}$, $T_{tempoit}$,
 $T_{incendio}$, $\Delta x = \Delta y = 0,1cm$

- 1 Cria matriz $T(X_{dim}, Y_{dim})$;
- 2 **início**
- 3 inicializa $T(X_{dim}, Y_{dim}) = T_{ambiente}$
- 4 **para** p de 0 até N_{it} **faça**
- 5 Sendo $T_\infty = T_{incendio}$;
- 6 **para** j de 0 até X_{dim} e k de 0 até Y_{dim} **faça**
- 7 **se** Ponto nodal no vértice interno **então**
- 8
$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{2}{3}Fo(2T_{m+1,n}^p + 2T_{m,n+1}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n-1}^p + 2BiT_\infty^p) +$$

$$\left(1 - 4Fo - \frac{4}{3}FoBi\right)T_{m,n}^p.$$
- 9 **fim**
- 10 **se** Ponto Nodal em um vértice interno com convecção **então**
- 11
$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{2}{3}Fo(2T_{m-1,n}^p + 2T_{m,n+1}^p + T_{m+1,n}^p + T_{m,n-1}^p + 2BiT_\infty^p) +$$

$$T_{m,n}^p \left(\frac{4}{3} - 4Fo - \frac{4}{3}FoBi\right)$$
- 12 **fim**
- 13 **se** Ponto nodal em uma superfície plana com convecção **então**
- 14
$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{Fo}{2}(2T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) - T_{m,n}^p(2Fo + FoBi - 1) + FoBiT_\infty^p.$$
- 15 **fim**
- 16 **se** Ponto nodal em um vértice externo com convecção **então**
- 17
$$T_{m,n}^{p+1} = 2Fo(T_{m,n-1}^p + T_{m-1,n}^p + 2BiT_\infty^p) + T_{m,n}^p(-4Fo - 4BiFo + 4).$$
- 18 **fim**
- 19 **fim**
- 20 **fim**
- 21 **fim**

6.2.2 Algoritmo do Incêndio Padrão

Para o incêndio padrão apresenta-se a rotina de cálculo no Algoritmo 2, onde são ordenados todos os passos de cálculo.

Para calcular o incêndio padrão deve-se inserir o tempo de simulação desejado ($T_{simulacao}$), a temperatura ambiente do local antes do incêndio (T_{amb}), a área total das

Algoritmo 2: INCÊNDIO PADRÃO

Entrada: T_{amb} , $q_{f,d}$, H , A_v , A_h , A_f , ρ , c , λ , $t_{it}(s)$ e $T_{simulacao}$

1 início

2 Para $t_{it} = 0.016$ segundos

3 Calcula $N_{it} = T_{simulacao}/t_{it}$

4 Calcula $\gamma_n = \gamma_{n1}\gamma_{n2}\gamma_{n3}$, conforme Tab. 3

5 Calcula $\gamma_s = \gamma_{s1}\gamma_{s2}$, conforme Tab. 4

6 $W = \left(\frac{6}{H}\right)^{0.3} \left[0.62 + \frac{90(0.4 - \frac{A_v}{A_f})^4}{1 + 12.5(1 + 10\frac{A_v}{A_f})\frac{A_h}{A_f}} \right] \geq 0.5$

7 Calcula $b = \sqrt{\rho c \lambda}$

8 Determina-se $M = 1$ para o aço;

9 Calcula $t_e = q_{f,i,k} \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s \cdot K \cdot W \cdot M$.

10 **para** l **de** 1 **até** N_{it} **faça**

11 | $T_{incendio}(l) = 345 \log_{10}(8 \cdot t_{it}/60 + 1) + T_0$,

12 **fim**

Saída: $T_{incendio}$, t_e

13 fim

aberturas verticais (A_v), a área de ventilação horizontal-piso (A_h), área de piso do compartimento analisado (A_f) e a altura do compartimento (H). Os parâmetros como peso específico (ρ), calor específico (c) e condutibilidade térmica (λ), estão relacionados ao material do piso, da parede e do teto, para calcular a absorvidade térmica (b). O valor carga característica de incêndio ($q_{f,d}$) está ligada ao uso/ocupação da edificação ou à quantidade de material combustível disponível, conforme escolha do usuário, de acordo com a NBR 14432 (ABNT, 2001a).

O primeiro passo que o algoritmo executa é calcular o número de interações que irá realizar através da divisão do tempo de simulação informado, pelo tempo de interação já pré-definido de 0.016 segundos. Logo após, serão calculados os parâmetros relacionados ao tempo equivalente, que envolvem a determinação do coeficiente que leva em conta a presença de medidas de proteção ativa γ_n , e do coeficiente de segurança que depende dos riscos e das consequências que podem ser causadas pelo colapso, calculados conforme a Seção 5.1 deste trabalho.

Os parâmetros M , K e W usados para calcular o tempo equivalente estão relacionados ao material estrutural, às características térmicas dos elementos de vedação e ao fator associado à ventilação do ambiente, respectivamente, calculados conforme Seção 5.1. Concluída a rotina de cálculo a saída do algoritmo é a curva de desenvolvimento do incêndio no tempo e o valor do tempo equivalente, que serve para delimitar a máxima temperatura atingida no incêndio padrão.

6.2.3 Algoritmo do Incêndio Natural

Para concepção do comportamento do incêndio natural são levadas em consideração alguns parâmetros adicionais aos usados no incêndio padrão, conforme a Seção 5.2

deste trabalho, o que pode ser observado de acordo com descrição do Algoritmo 3.

Algoritmo 3: INCÊNDIO NATURAL

Entrada: T_{amb} , $q_{f,d}$, A_h , A_t , h_{eq} , t_{lim} , ρ , c , λ , $t_{it}(s)$, $T_{simulacao}$, $t_{it} = 0.016s$

- 1 **início**
- 2 Calcula $N_{it} = T_{simulacao}/t_{it}$
- 3 Calcula $q_{t,d} = q_{fd} \cdot A_f/A_t$;
- 4 Calcula $F_v = A_v \cdot h_{eq}^{1/2}/A_t$;
- 5 Calcula $t_{max} = \max \left[\left(\frac{0.0002q_{t,d}}{F_v} \right); t_{lim} \right]$;
- 6 Calcula $b = \sqrt{\rho c \lambda}$;
- 7 **se** $t_{max} == t_{lim}$ **então**
- 8 $\Gamma = \frac{\left(\frac{F_v}{0.04} \right)^2}{\left(\frac{b}{1160} \right)^2}$;
- 9 $t^* = t\Gamma$;
- 10 $t_{max}^* = t_{max}\Gamma$.
- 11 **fim**
- 12 **se** $t_{max} > t_{lim}$ **então**
- 13 $F_{vlim} = 0.1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,f}}{t_{lim}}$;
- 14 $j = 1 + \frac{F_v - 0.04}{0.04} \cdot \frac{q_{t,d}^{-75}}{75} \cdot \frac{1160 - b}{1160}$;
- 15 $\Gamma_{lim} = j \frac{(F_{vlim}/b)^2}{(0.04/1160)^2}$;
- 16 $t^* = t\Gamma_{lim}$;
- 17 $t_{max}^* = t_{max}\Gamma_{lim}$.
- 18 **fim**
- 19 **para** l **de** 1 **até** N_{it} **faça**
- 20 **se** $\frac{l \cdot t_{it}}{3600} < t_{max}^*$ **então**
- 21 $T_{incendio}(l) = 1325(1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*}) + T_{amb}$
- 22 **fim**
- 23 **se** $\frac{l \cdot t_{it}}{3600} == t_{max}^*$ **então**
- 24 $\theta_{max} = T_{incendio}(l)$
- 25 **fim**
- 26 **se** $\frac{l \cdot t_{it}}{3600} \geq t_{max}^*$ **então**
- 27 **se** $t_{max}^* \leq 0.5$ **então**
- 28 $T_{incendio}(l) = \theta_{max} - 625(t^* - t_{max}^*x)$,
- 29 **fim**
- 30 **se** $0.5 < t_{max}^* \leq 2$ **então**
- 31 $T_{incendio}(l) = \theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - t_{max}^*x)$,
- 32 **fim**
- 33 **se** $t_{max}^* > 2$ **então**
- 34 $T_{incendio}(l) = \theta_{max} - 250(t^* - t_{max}^*x)$,
- 35 **fim**
- 36 **fim**
- 37 **fim**
- 38 **fim**

Saída: $T_{incendio}$

Dentre os parâmetros inseridos como entrada para o algoritmo do incêndio natural

têm-se a temperatura ambiente antes do incêndio (T_{amb}), a área total das aberturas (A_h) e a área total da superfície interna do compartimento A_t , calculada pelo algoritmo através da soma da área de piso, parede e teto, inserida pelo usuário. A altura equivalente das aberturas do compartimento h_{eq} , deve ser calculada conforme Equação (5.14). Para este caso, assim como no incêndio padrão a absorvidade térmica (b) é calculada através peso específico (ρ), calor específico (c) e a condutibilidade térmica (λ), dos materiais de revestimentos, pela Equação (5.10).

O número de iterações é determinado da mesma forma que para o incêndio padrão. A rotina de cálculos prossegue com a definição do fator de ventilação, dado pela Equação (5.13), utilizado juntamente com a absorvidade térmica na determinação de Γ . O próximo passo é encontrar o valor de cálculo da carga de incêndio específica ($q_{f,d}$), com base nas cargas de incêndio específicas, de acordo com a Figura 8, ou no potencial calorífico específico dos componentes do interior da edificação, Figura 9, utilizando a Equação (5.16).

A partir da seleção por parte do usuário sobre o tempo-limite mínimo de incêndio t_{lim} , definido pela seleção do ambiente, tratado na Seção 4.2, é determinado o tempo fictício máximo, definido pela condição se t_{max} é maior ou igual a t_{lim} . Definido estes parâmetros e os resultados subsequentes, a curva ascendente do incêndio é definida pela Equação (5.17) e a curva do ramo descendente pela Equação (5.24).

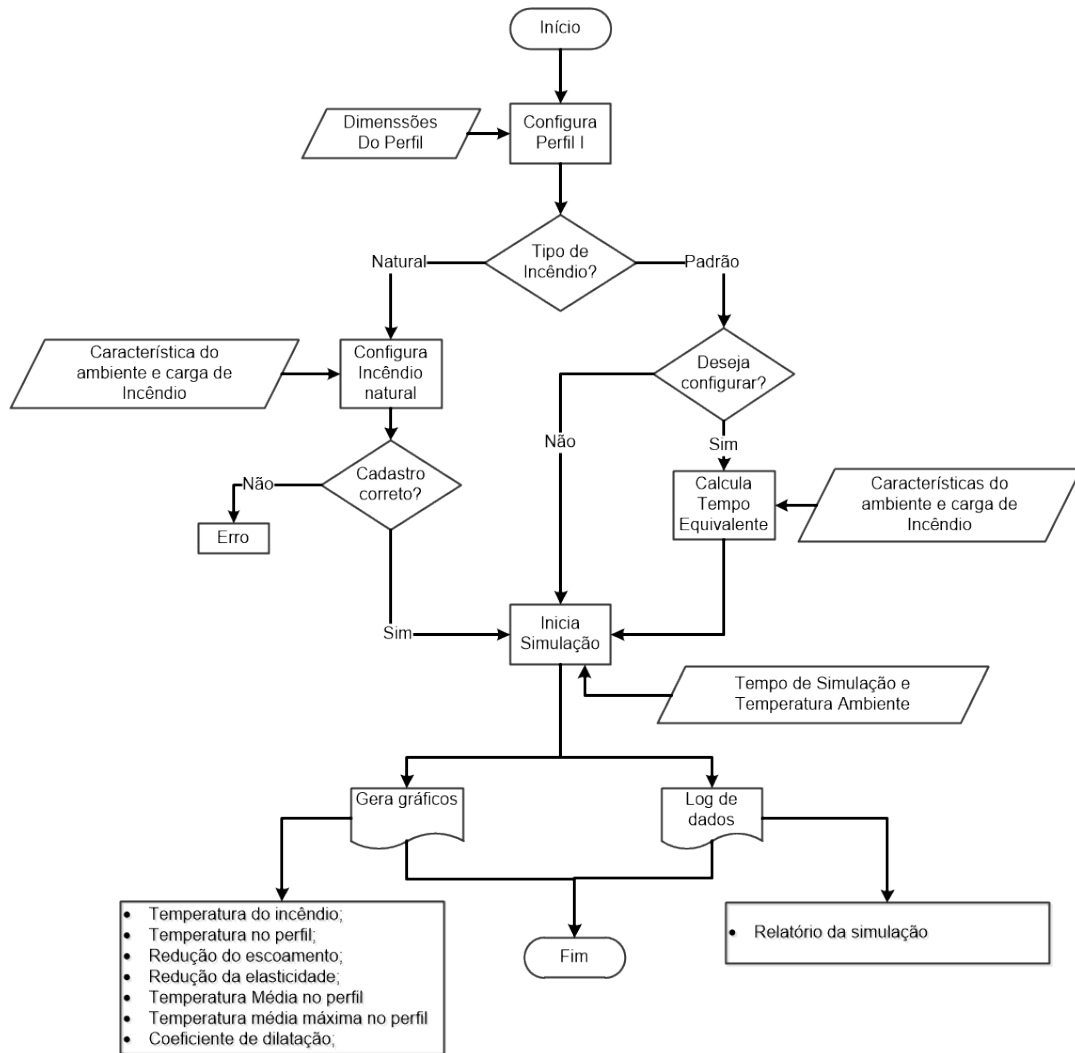
6.3 Desenvolvimento lógico

O fluxograma da Figura 16 representa de maneira sucinta a lógica de funcionamento do programa *IFire-Simulation*, que vai desde a inserção dos dados das dimensões desejadas para o perfil, até a determinação do tipo de incêndio e sua respectiva configuração.

O sistemas tem como resultado a representação gráfica da variação da temperatura em cada região do perfil I no decorrer do tempo, além de gráficos que representam parâmetros como a perda de elasticidade e a redução do limite de escoamento da peça.

Dessa forma, na próxima seção, mostra-se toda a interface gráfica desenvolvida, onde a sequencia de entrada de dados deve seguir o fluxograma da Figura 16, caso contrário, o software apresentará erros no processo de execução.

Figura 16 – Diagrama lógico do sistema de simulação



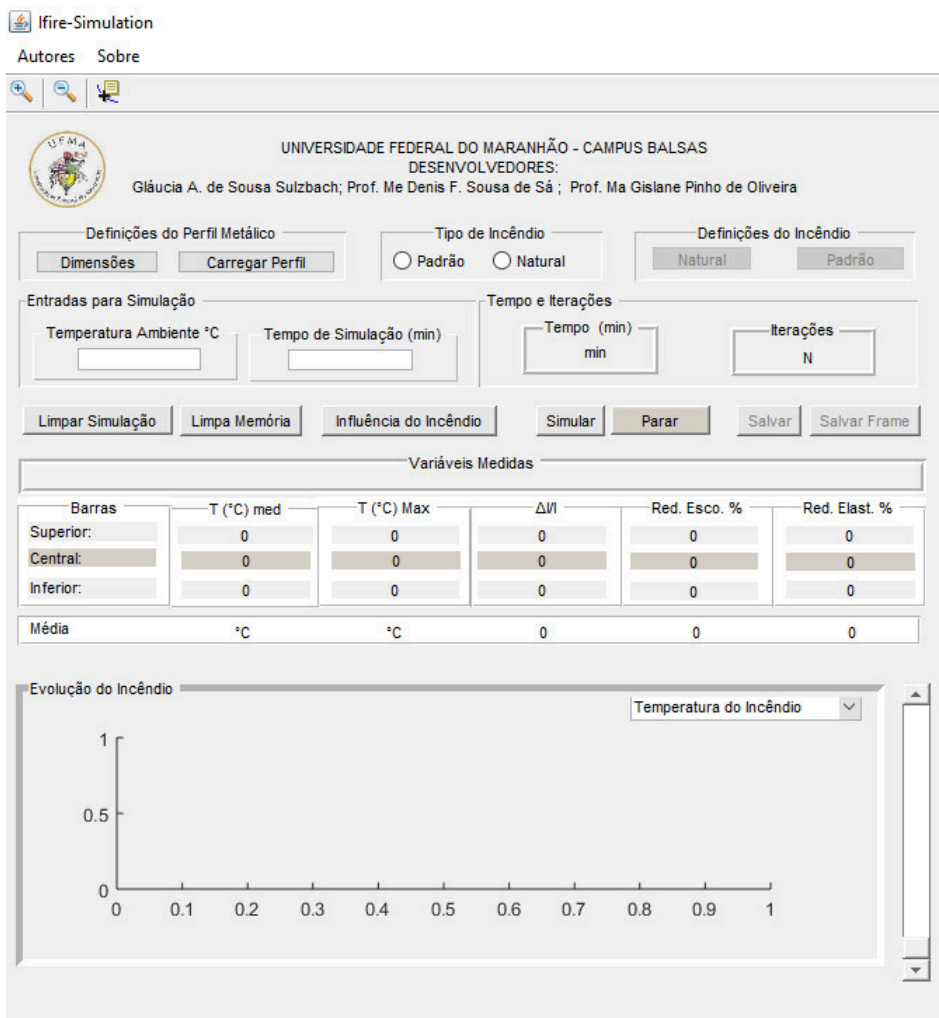
Fonte: Autor

6.4 Utilizando o programa

A interface principal do programa conta com a guia de definição das dimensões do perfil, a guia de escolha entre o método do incêndio padrão e do incêndio natural e as opções para defini-los. Ele também contém um espaço para inserção de dados como a temperatura do ambiente antes do momento do incêndio e a definição do tempo de simulação, Figura 17.

Na tela principal encontram-se disponíveis os gráficos da temperatura do incêndio, da temperatura média e máxima na peça, da redução no coeficiente de dilatação térmica, de elasticidade e de escoamento. Além, de uma tabela que mostra a variação de todas esses quesitos com o tempo em cada componente da peça: a mesa superior, inferior e a alma.

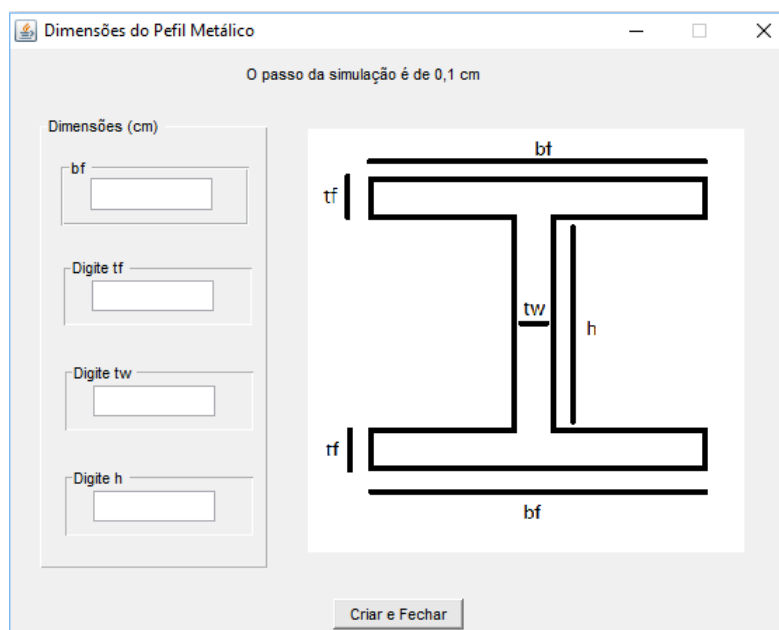
Figura 17 – Tela inicial do *IFire- Simulation*



Fonte: “*IFire-Simulation*”

O primeiro passo a ser realizado pelo usuário é a inserção das dimensões do perfil escolhido, para isto ele deverá selecionar o botão “Dimensões”, na tela inicial, e inserir os dados da peça, Figura 18.

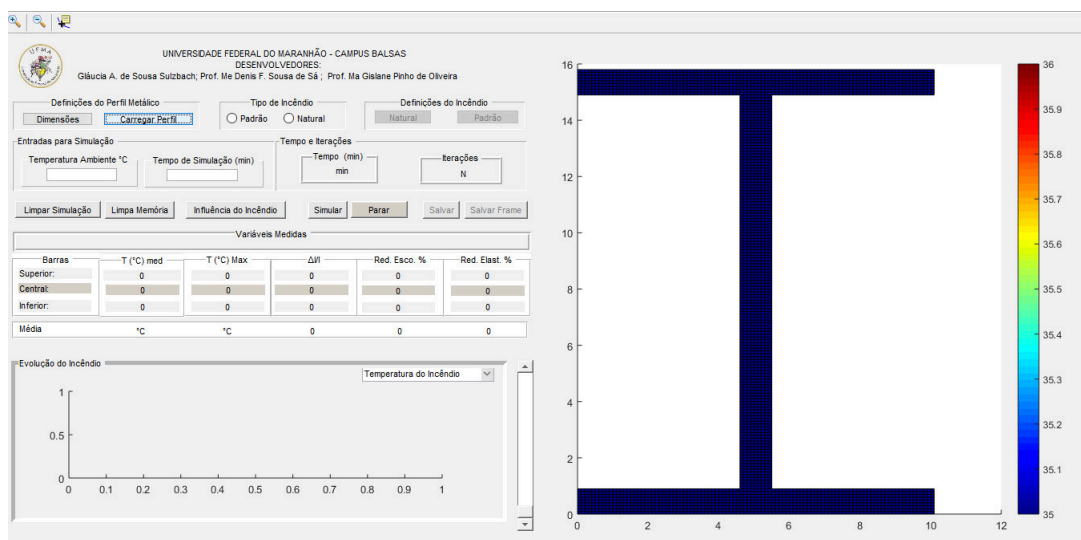
Figura 18 – Dimensões do perfil metálico



Fonte: “IFire-Simulation”

Após inserir as informações, deve-se clicar em “Carregar perfil”, onde a tela inicial mostrará a representação bidimensional da peça, conforme ilustra a Figura 19.

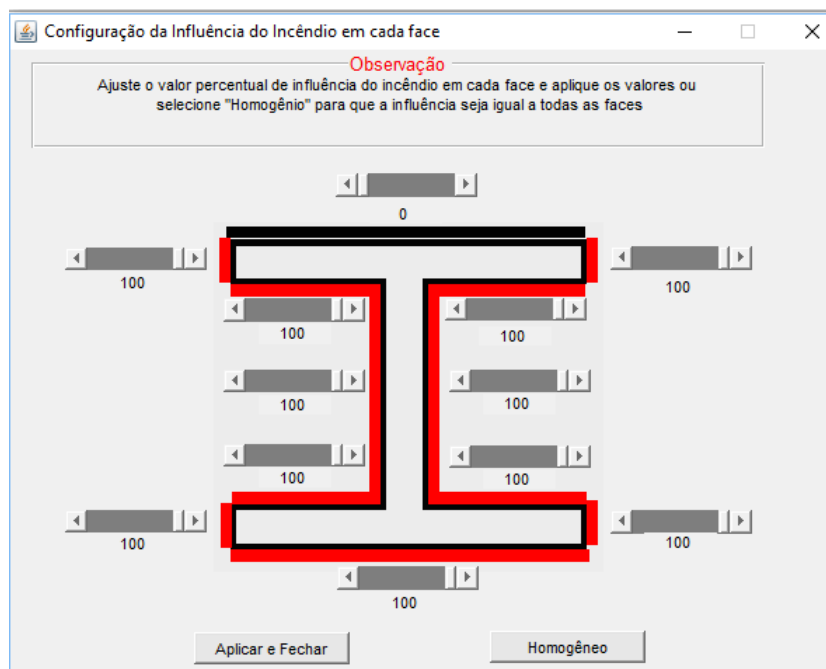
Figura 19 – Representação em 2D do perfil



Fonte: “IFire-Simulation”

O software também se adéqua às mais diversas situações as quais o perfil possa estar submetido, permitindo que seja alterada a influência do incêndio em cada uma de suas faces através do botão “Influência do Incêndio”, Figura 20.

Figura 20 – Configuração da influência do incêndio em cada face



Fonte: "IFire-Simulation"

Ao definir o tipo de incêndio o usuário deverá fazer as definições necessárias para cada tipo, exceto para o incêndio padrão que pode ser definido sem essas configurações, porém, essa opção não calcula o tempo equivalente.

No caso da escolha do incêndio padrão, na definição dos parâmetros será aberta uma janela conforme Figura 21, que pedirá informações geométricas do ambiente, a existência de algum meio de proteção contra incêndio, o risco de ativação desse incêndio, além do material de revestimento da parede, do piso e do teto.

Figura 21 – Configuração do incêndio padrão

Configuração do incêndio padrão

Características Geométricas

Área de ventilação vertical (m²)

Área de ventilação horizontal (m²)

Área de piso do compartimento analisado (m²)

Área de parede (m²)

Área de teto (m²)

Altura do compartimento (m)

Configure o Uso/Ocupação

Uso/Ocupação

Risco de ativação de incêndio

Pequeno

Normal

Médio

Alto

Revestimento

Teto: Gesso

Parede: Gesso

Piso: Concreto

Selecione os meios de proteção

Existência de chuveiros automáticos

Brigada contra incêndio não profissional

Brigada contra incêndio profissional

Existência de detecção automática de incêndio

Aplicar e fechar

Fonte: “IFire-Simulation”

Também é necessário inserir a informação sobre qual o tipo de uso/ocupação do local, ao clicar no botão “Uso/Ocupação”, onde uma nova janela é aberta, como mostra a Figura 22. Lá é possível selecionar um dos itens que constam na ABNT (2001a).

Figura 22 – Configuração do Uso/ Ocupação

Selecione a Ocupação/uso

Residencial

Serviços de Hospedagem

Comercial Varejista

Serviços profissionais, pessoais e técnicos

Educação e Cultura física

Locais de Reunião pública

Serviços Automotivos

Serviços de Saúde e institucionais

Indústria

Selecione a descrição

Alojamento de Estudantes

Apartamentos

Casa térrea ou sobrados

Pensionatos

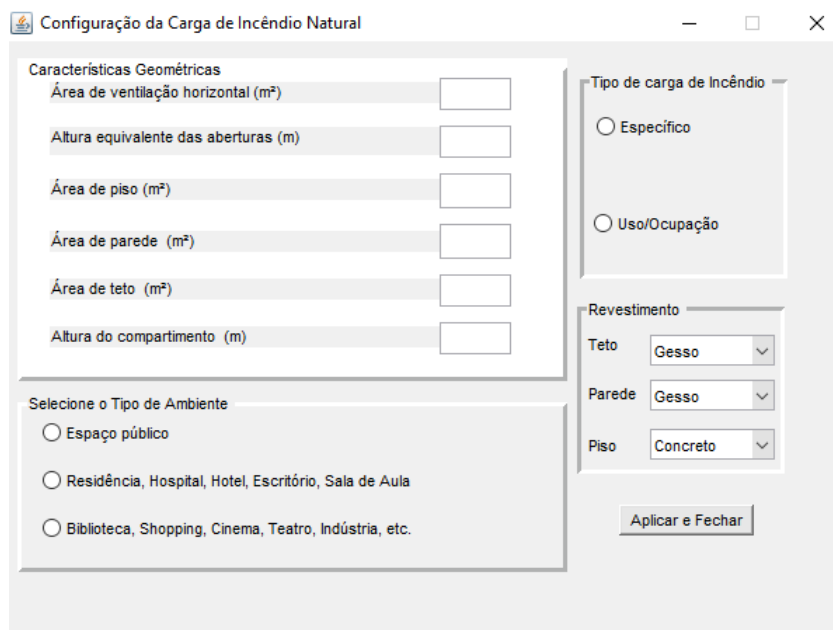
Selecionar

Selecionar e Fechar

Fonte: “IFire-Simulation”

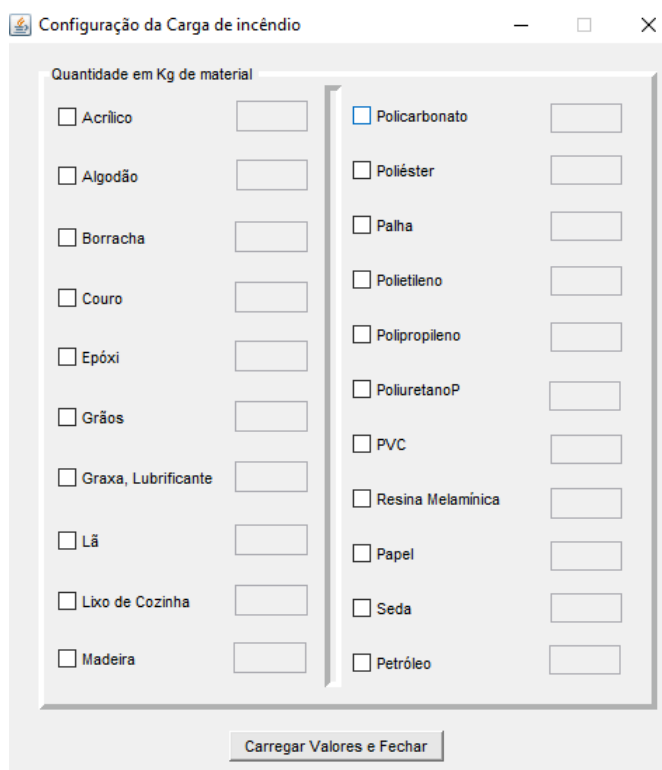
Para o incêndio natural também são solicitados dados geométricos sobre o local, além do tipo de ambiente, material de revestimento da parede, do piso e do teto, Figura 23. Quanto à carga de incêndio, são oferecidas duas opções: referente ao uso e ocupação, conforme Figura 22, ou de acordo com a carga específica de incêndio, Figura 24, onde são selecionados os materiais que se encontram no ambiente no momento do incêndio e informadas suas respectivas massas.

Figura 23 – Configuração do incêndio natural



Fonte: “IFire-Simulation”

Figura 24 – Configuração da carga específica de incêndio



Fonte: “IFire-Simulation”

Após inseridas todas as informações necessárias, o usuário deverá clicar no botão “Simular”. A partir deste ponto, o programa começará a realizar a simulação, onde é

possível interromper esse processo utilizando o botão “Parar”.

Após o fornecimento dos resultados todas as informações poderão ser salvas, incluindo gráficos de temperatura do incêndio e na peça, como a temperatura média e máxima em cada componente do perfil e a média das temperaturas máximas em cada um desses componentes. Também são gerados gráficos sobre a redução no coeficiente de elasticidade e escoamento, e da dilatação térmica sofrida pela peça durante o incêndio.

Também é gerada uma animação em formato “gif” da evolução da temperatura na peça em 2D, trazendo uma noção panorâmica das temperaturas em cada região da peça. O programa também traz a opção de salvar as informações em tempos distintos, através do botão “Salvar Frame”.

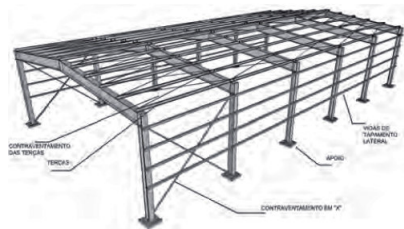
Tudo isso foi desenvolvido com o intuito de permitir uma análise da estrutura em situação de incêndio, possibilitando a elaboração de um projeto estrutural com estimativas confiáveis sobre o que aconteceria com a estrutura da edificação quando exposta à altas temperaturas. O software também é voltado para a prevenção de possíveis danos à estrutura, fornecendo a realidade aproximada da temperatura na peça sendo, portanto, um instrumento que possibilita a escolha mais adequada do meio de proteção sem desperdício de recursos, uma vez que combate exageros ou déficits.

7 ANÁLISE TÉRMICA DO PERFIL I

Neste capítulo é apresentada uma simulação realizada para demonstrar as utilidades do software “IFire- Simulation”.

A simulação teste foi realizada tomando por base um galpão com função para pintura de peças automotivas, de dimensões de 10x30m, feito em estrutura metálica e com o telhado formado por perfis “I”. Para efeitos de influência do incêndio considerou-se que por estar em contato direto com a telha, a superfície superior do perfil não recebe calor dos gases convectivos do ambiente, apenas por condução. A Figura 25 mostra um modelo semelhante ao adotado para edificação.

Figura 25 – Galpão modelo

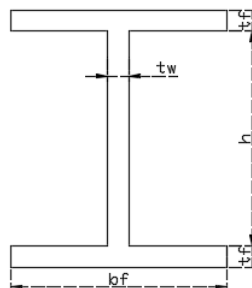


Fonte: (CBCA, 2010)

7.1 Dados da Simulação

O perfil levado em consideração pertence à Gerdau, de bitola 6”, onde a Figura 26 mostra a nomenclatura das dimensões do perfil necessárias para análise.

Figura 26 – Dimensões perfil I



Fonte: Autor

Para a simulação em questão foram utilizados os seguintes valores:

- $h = 14.3$ cm;

- $t_w = 0.9$ cm;
- $t_f = 0.9$ cm;
- $b_f = 8.8$ cm.

Definidas as dimensões do perfil, definem-se os dados para a configuração do incêndio padrão e natural.

Caso 1: dados para incêndio padrão.

- Temperatura ambiente = 30 °C;
- Tempo de simulação = 90 minutos;
- Área ventilação vertical (teto): 0;
- Área ventilação horizontal (portas, janelas, similares): $18m^2$;
- Área de piso: $300m^2$;
- Área de parede: $320m^2$;
- Área de teto: $302.1m^2$;
- Altura do compartimento: 4.60m;
- Meios de proteção: Nenhum;
- Carga de incêndio: Uso/ocupação- Industrial/ Automotiva e peças (pintura);
- Risco de ativação: Médio;
- Revestimento: Teto- Fibrocimento; Parede- Concreto comum; Piso- Concreto.

Caso 2: dados para incêndio natural.

- Temperatura ambiente = 30 °C;
- Tempo de simulação = 90 minutos;
- Área ventilação horizontal: $18m^2$;
- Altura equivalente das aberturas: 1.5 m;
- Área de piso: $300m^2$;
- Área de parede: $320m^2$;
- Área de teto: $302.1m^2$;
- Altura do compartimento: 4.60m;
- Tipo de ambiente: Indústria;
- Carga de incêndio: Uso/ocupação- Industrial/ Automotiva e peças (pintura);

- Revestimento: Teto- Fibrocimento; Parede- Concreto comum; Piso- Concreto.

Além das definições apresentadas, é necessário definir a influência do incêndio, que foi de 100% em todas as partes da peça, exceto na mesa superior que fica em contato com a telha, já que esta pode ser considerada uma superfície isolada da influência do calor de convecção do incêndio e influenciada apenas pelo calor de condução.

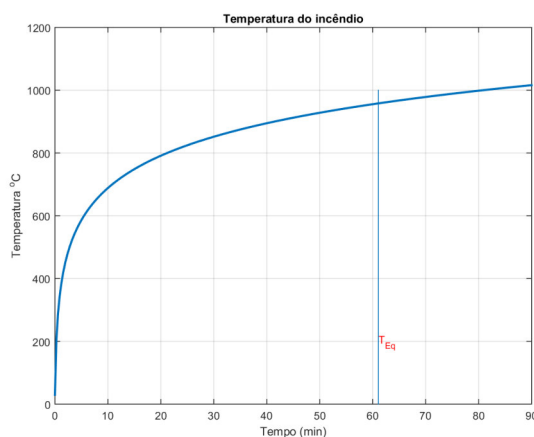
7.2 Resultados da Simulação

Nesta seção são abordados os resultados obtidos com as simulações realizadas no software desenvolvido “IFire-Simulation”, com os dados da seção anterior.

7.2.1 Resultados da Simulação- Incêndio Padrão

A partir da simulação do incêndio padrão obteve-se a curva demonstrada na Figura 27, que mostra o tempo equivalente de 61 minutos, demonstrando que neste ponto se encontra a máxima temperatura do incêndio, que corresponde a aproximadamente $1000^{\circ}C$.

Figura 27 – Curva Incêndio Padrão

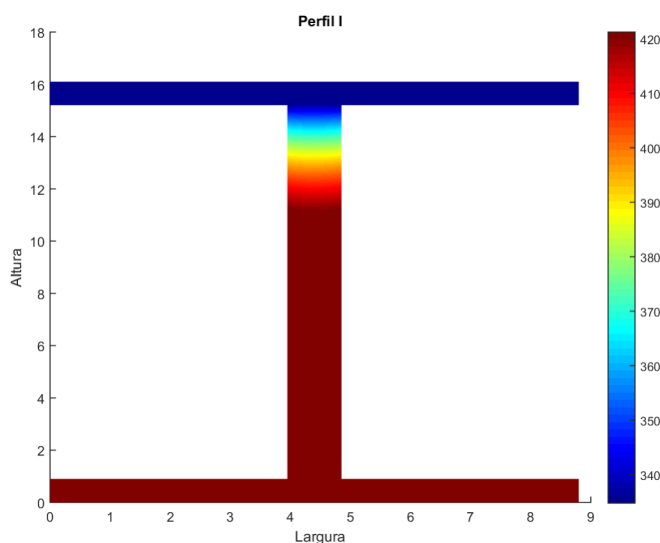


Fonte: *IFire-Simulation*

Partindo para análise da influência do incêndio na distribuição de calor na peça, têm-se que para o tempo de simulação de cinco minutos a distribuição de calor apresentou alta concentração na mesa inferior. Tal fato é decorrente do contato direto dessa superfície com as correntes convectivas advindas das chamas do incêndio, apresentando temperaturas à $420^{\circ}C$, como apresenta a Figura 28.

A mesa superior, que não possui influência direta do incêndio, é a que apresenta as menores temperaturas, mas ainda assim possui um valor elevado, chegando a $340^{\circ}C$, apenas pelo efeito da condução de calor na peça. Nesse tempo, a alma do perfil já atinge

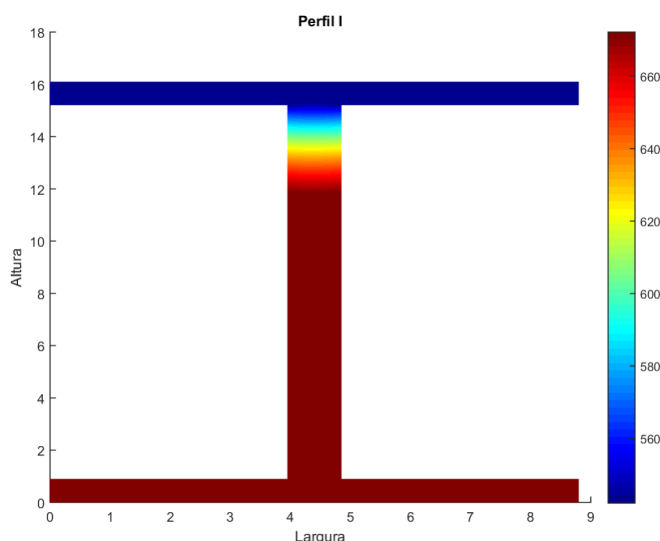
Figura 28 – Distribuição de temperatura no Perfil I em 5min - Inc. Padrão

Fonte: *IFire-Simulation*

valores elevados de temperatura e a peça, por completo, atinge uma temperatura média de $402.8^{\circ}C$.

A Figura 29, mostra como a distribuição de calor na peça metálica evolui quando o incêndio atinge 20 minutos.

Figura 29 – Distribuição de temperatura no Perfil I em 20min - Inc. Padrão

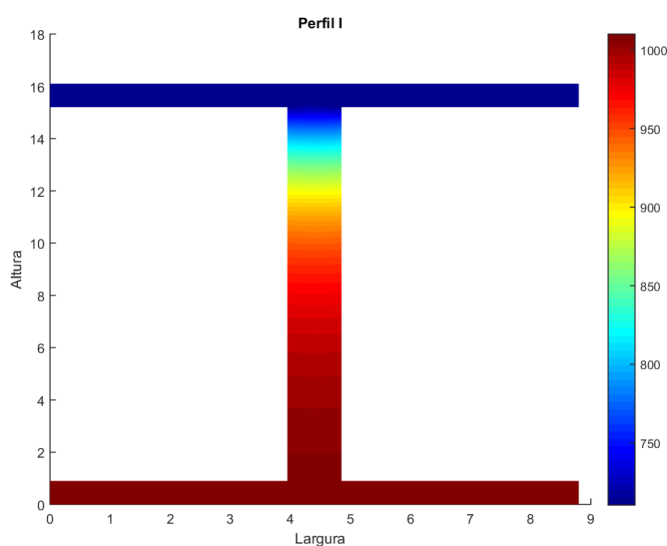
Fonte: *IFire-Simulation*

Nessa análise, nota-se uma grande evolução na temperatura média do perfil que passou a ser de $643.7^{\circ}C$, ponto onde as propriedades resistentes do aço começam a decrescer. Nesse ponto, já são identificadas temperaturas na ordem de $660^{\circ}C$ na mesa inferior

do perfil e de até 560°C próximo à mesa superior.

Quando o incêndio atinge 61 minutos, o que corresponde à máxima temperatura do incêndio através do tempo equivalente, Figura 30, as temperaturas na peça chegam a 1000°C na mesa inferior e na alma do perfil, o que já corresponde à praticamente perda total das propriedades do aço. A menor temperatura registrada para esse tempo está na mesa superior que chega a 750°C , e a peça como um todo, a temperatura média de 819°C .

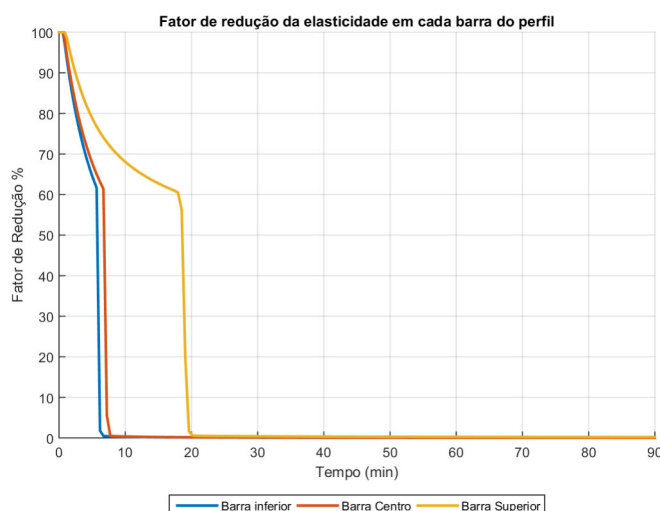
Figura 30 – Distribuição de temperatura no Perfil I em 61min - Inc. Padrão



Fonte: *IFire-Simulation*

As alterações em propriedades do aço, como a elasticidade, são notórias com o aumento da temperatura no perfil, a Figura 31 mostra o decaimento do fator de elasticidade da peça com a variação da temperatura no tempo.

Figura 31 – Fator de redução da elasticidade - Inc. Padrão



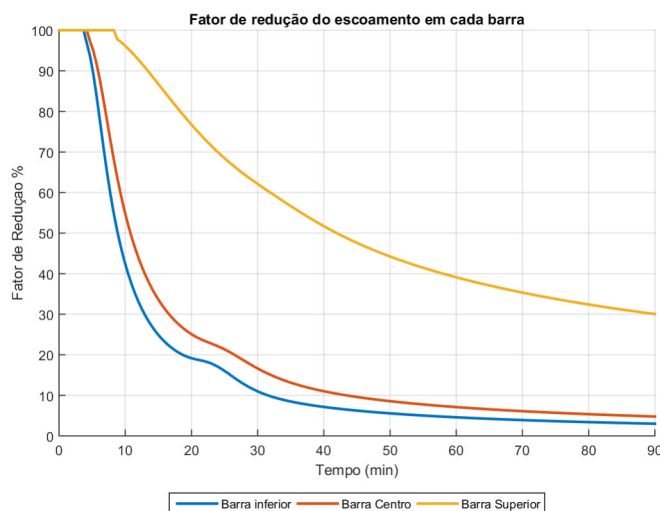
Fonte: *IFire-Simulation*

A mesa inferior do perfil é a que mais sofre alterações na redução do fator de elasticidade, passando de 100% em temperatura ambiente, para 61% em cinco minutos, ou seja, há uma perda de 39% da elasticidade que era apresentada pelo material antes do incêndio, o que é justificado pela presença de temperaturas na ordem de 420°C nesse ponto. Essa propriedade apresenta um decaimento rápido com o tempo, atingindo o grau de 100% de perda por volta de sete minutos.

Já a barra superior é a que mais resiste ao aumento nesse coeficiente atingindo em cinco minutos apenas 22% de perda da elasticidade, e atingindo a perda total em torno de 20 minutos.

A redução do coeficiente de escoamento também se mostra bastante significativa na peça, Figura 32, onde na mesa inferior a simulação mostra que em cinco minutos de incêndio, ela apresenta 10% de perda e em 20 minutos decai bruscamente para 80%. A situação é mais agravante quando o tempo equivalente é atingido, chegando a 95,5% de perda.

Figura 32 – Fator de redução do escoamento - Inc. Padrão



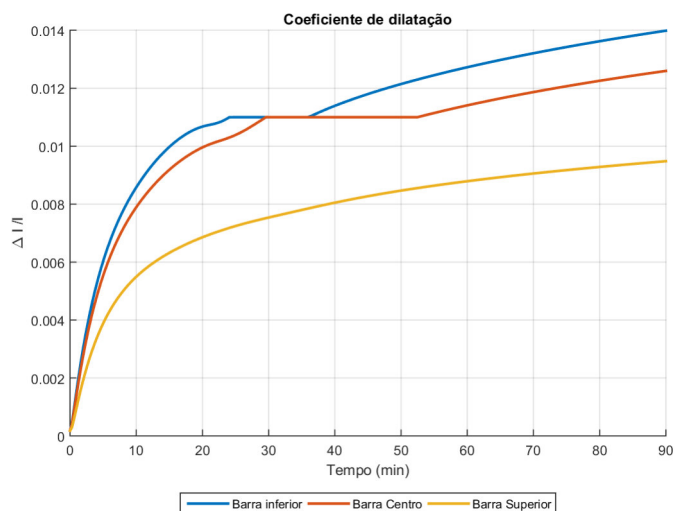
Fonte: *IFire-Simulation*

A barra superior ainda é a que menos sofre o efeito das altas temperaturas a curto prazo, mas ao passar do tempo atinge reduções alarmantes nas propriedades mecânicas. Aos cinco minutos de incêndio ainda continua com 100% do fator de escoamento, mas aos 20 minutos esse valor decai para 76,43%, e aos 61 minutos para 38,72%.

Porém, mesmo apresentando menores temperaturas na mesa superior a peça necessita funcionar de maneira equilibrada, com todos os seus componentes para garantir a estabilidade perante a atuação de cargas, o que não ocorre devido ao fato da mesa inferior e a alma apresentarem temperaturas bastante elevadas, que indicam perdas significativas em propriedades importantes para a segurança estrutural.

A Figura 33 mostra como ocorre a dilatação da peça com a evolução do tempo de incêndio, onde observa-se que para o pior caso a peça sofre uma dilatação de $0.015m/m$, ou seja, aproximadamente 1,5%.

Figura 33 – Coeficiente de dilatação- Inc. Padrão

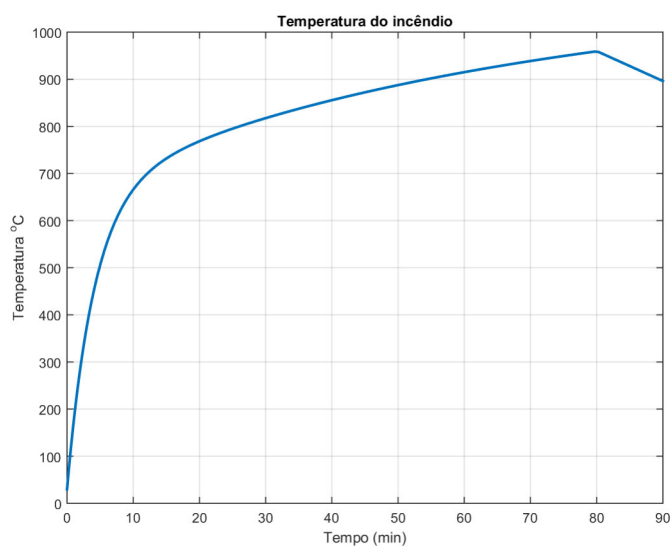


Fonte: *IFire-Simulation*

7.2.2 Resultados da Simulação- Incêndio Natural

Para o incêndio natural a curva de incêndio comportou-se conforme Figura 34, atingindo uma temperatura máxima na ordem de $958^{\circ}C$ em 80 minutos.

Figura 34 – Curva Incêndio Natural

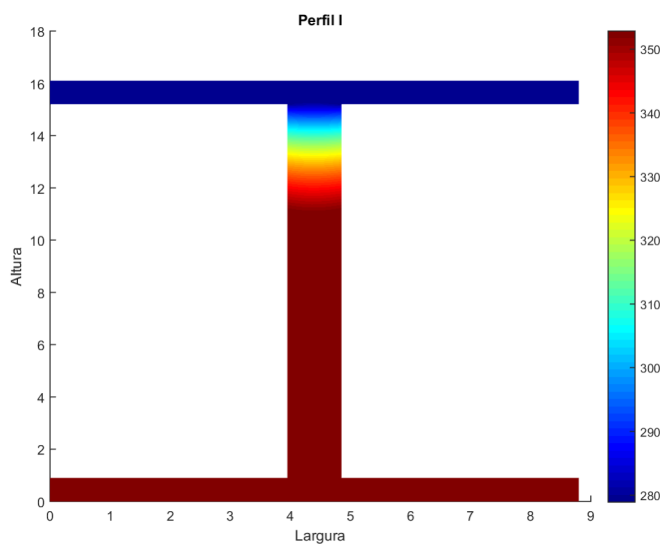


Fonte: *IFire-Simulation*

Para o tempo de cinco minutos de incêndio, observa-se na Figura 35 que a distribuição de temperatura na mesa inferior da peça chega a atingir temperaturas em torno

de 350°C , e as menores temperaturas na peça estão em torno de 280°C , o que fornece uma média de temperatura de 312.6°C .

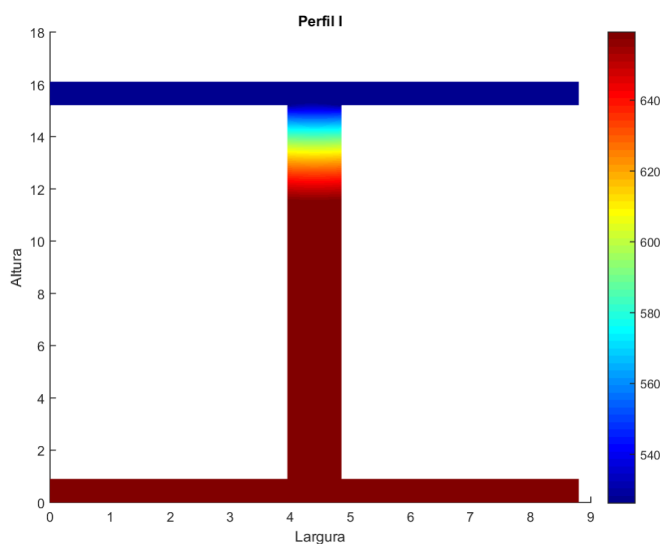
Figura 35 – Distribuição de temperatura no Perfil I em 5min- Inc. Natural



Fonte: *IFire-Simulation*

Atingidos 20 minutos, a distribuição de calor na peça é representada pela Figura 36, com temperaturas além da faixa de 640°C , e a temperatura média na peça de 632.2°C .

Figura 36 – Distribuição de temperatura no Perfil I em 20min- Inc. Natural

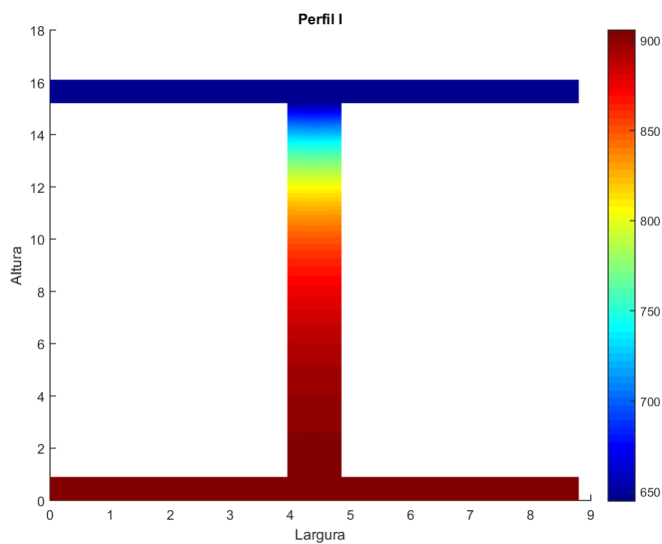


Fonte: *IFire-Simulation*

Diferentemente do incêndio padrão, a simulação do incêndio natural apresentou o pico de temperatura somente aos 80 minutos de incêndio, e a Figura 37 representa a

distribuição de temperatura nesse instante.

Figura 37 – Distribuição de temperatura no Perfil I em 80min - Inc. Natural

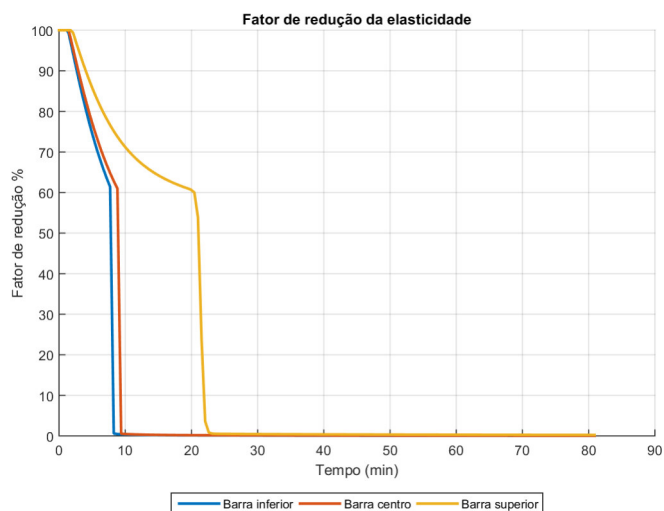


Fonte: *IFire-Simulation*

Portanto, para o caso da Figura 37, a peça metálica chegou a alcançar temperaturas em torno de 900°C na mesa inferior, e temperaturas de 650°C na mesa superior para o tempo de uma hora e vinte minutos.

Analisando as mudanças nas propriedades mecânica do perfil I, têm-se que em torno de dez minutos a mesa inferior e a alma do perfil perderam completamente suas propriedades elásticas, e a mesa superior atingiu esse patamar por volta de 22 minutos, Figura 38.

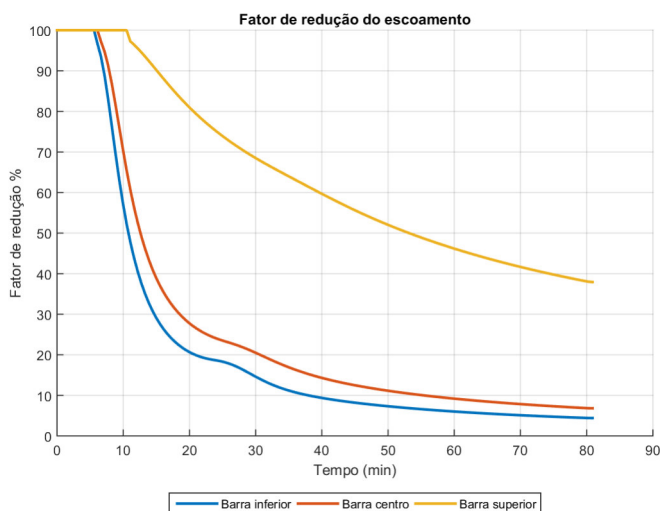
Figura 38 – Fator de redução da elasticidade - Inc. Natural



Fonte: *IFire-Simulation*

No que tange o escoamento demonstrado pela Figura 39, aos cinco minutos de incêndio toda a peça manteve totalmente o valor para esta propriedade, porém aos 20 minutos ocorre uma perda de 80% do valor dessa propriedade para a mesa inferior e a alma, enquanto que a mesa superior ainda apresentava uma perda de apenas 18%. Porém, em uma hora e vinte minutos de incêndio a peça já havia perdido 93.2% do fator de escoamento, e mesmo que mesa superior apresente valores na ordem de 62% a perda obtida é muito alta e a peça já encontra-se em estado de plastificação, ou seja, possui uma cedência muito elevada e não tem mais a possibilidade de retornar às suas características de antes do momento do incêndio, causando perda total da peça.

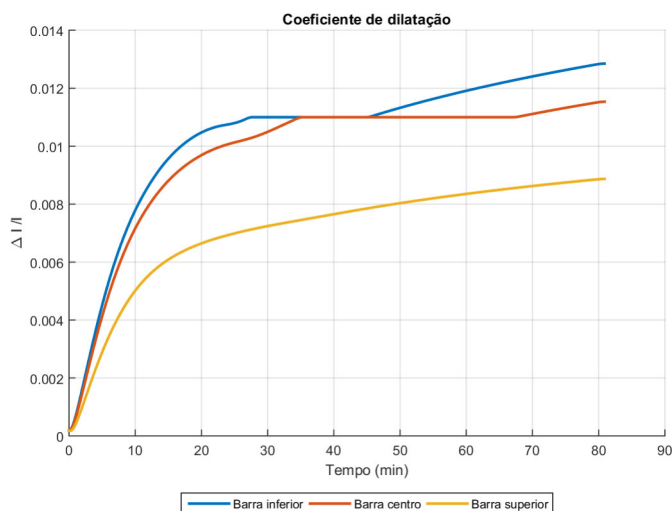
Figura 39 – Fator de redução do escoamento - Inc. Natural



Fonte: *IFire-Simulation*

A Figura 40, mostra que o perfil sofre uma dilatação térmica na ordem de $0.011m/m$, dilatando cerca de 1.1% em relação à sua forma inicial antes do incêndio.

Figura 40 – Coeficiente de dilatação - Inc. Natural



Fonte: *IFire-Simulation*

7.2.3 Comparativo dos resultados

Os resultados obtidos através do método do incêndio padrão e do incêndio natural mostram que o incêndio padrão apresenta dados de uma queima mais acelerada, onde se obtém temperaturas mais altas em menor intervalo de tempo, quando comparado ao

método natural. Como exemplo, pode-se citar o fato de que em cinco minutos de incêndio a temperatura média na peça para o incêndio padrão era de 402.8°C , enquanto no incêndio natural era de 312.6°C . O mesmo ocorre para o tempo de 20 minutos, que para o incêndio padrão forneceu uma temperatura de 643.7°C e para o natural uma média de 632.2°C .

Essa questão também fica bastante evidenciada quando o pico de temperaturas pelo método padrão é atingido em 61 minutos, por intermédio do uso do tempo equivalente, e a máxima temperatura registrada nesse momento gira em torno de 1000°C , ao passo de que pelo método natural o auge da elevação da temperatura é atingido somente aos 80 minutos de incêndio e as temperaturas registradas tendem a ser mais próximas a 900°C .

Quanto às propriedades mecânicas afetadas pela elevação da temperatura têm-se que para o incêndio padrão há perda total da elasticidade da peça em sete minutos, enquanto que no incêndio natural essa perda ocorre em dez minutos para a mesa inferior e a alma, o que também já é um indicativo de instabilidade no perfil.

No que se refere ao escoamento, os dois métodos se aproximaram ao indicarem dados sobre a perda de 80% da capacidade de escoamento inicial da peça em 20 minutos de incêndio, o que fornece um ponto onde o incêndio padrão forneceu um bom resultado de aproximação ao natural. Quanto à dilatação sofrida pela peça os dois métodos mostram pouca diferença entre o resultados, enquanto no incêndio padrão a dilatação chega a ser de 1.5% no incêndio natural esse valor é de 1.1%.

A explicação para este fato consiste no maior detalhamento de informações e complexidade exigido para elaboração da curva de incêndio natural, que acaba fornecendo uma melhor perspectiva da realidade. O incêndio padrão por não exigir elevada complexidade de inserção de dados e nos cálculos, acaba fornecendo uma curva que busca se aproximar do resultado da curva natural, apresentando uma maior faixa de erro.

Nada impede o projetista de utilizar o incêndio padrão na elaboração do projeto estrutural na norma brasileira conforme ABNT (2003), mas vale ressaltar que, por fornecer valores elevados com o intuito de ser à favor da segurança, o seu uso pode implicar em maiores custos para proteção da estrutura contra a ação do fogo. Portanto, é recomendado o uso da curva de incêndio natural para que o projetista tenha uma noção mais detalhada do comportamento da peça sob tais condições e possa fornecer uma solução econômica e viável para segurança em casos de incêndio.

Comparando os resultados obtidos com ensaios já realizados em laboratório onde o aço foi submetido à elevadas temperaturas, como apresenta o trabalho de LASKE e IBRAHIM (2018) e de WANG e LUI (2016), têm-se que para temperaturas a partir de 600°C a redução no módulo de elasticidade da peça é significativa, ao passo de que a partir dessa temperatura as outras propriedades também são afetadas, principalmente a tensão de escoamento, e em 800°C tais variações se mostram mais significativas ainda.

A norma NBR 15200, que trata do projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio (ABNT, 2012), também aborda sobre a redução da resistência do aço quando aquecido e mostra que o aço apresenta apenas 4% de sua resistência ao escoamento e módulo de elasticidade iniciais, o que mostra um resultado plausível quando comparado ao que é desenvolvido pelo software “*IFire-Simulation*”.

Fazendo uma análise geral dos resultados obtidos, pode-se dizer que as equações diferenciais desenvolvidas através do método das diferenças finitas mostraram uma boa adaptação na tarefa de demonstrar a distribuição de calor no perfil I ao longo da duração do incêndio. De acordo com os resultados da simulação nota-se que os nós localizados nas extremidades das barras são os que mais sofrem aumento de temperatura, por estarem em contato direto com os gases quentes do ambiente em chamas e pela localização em uma quina que o faz receber influência nas duas faces.

Outro ponto importante é que na alma e na mesa inferior da peça a temperatura é mais elevada do que na mesa superior. Dentre os motivos que explicam este fato estão o contato direto da alma e mesa inferior com as correntes convectivas de ar advindas do ambiente em chamas, enquanto a mesa superior recebe apenas calor por condução, além do elevado grau de esbeltez da seção que faz com que o processo de condução de calor seja mais rápido. Tal fato afeta diretamente na estabilidade global da peça, uma vez que por alcançar altas temperaturas a alma da peça tende a chegar ao seu limite de escoamento mais rápido, correndo o risco de ser o primeiro ponto a romper durante o incêndio.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção são mostradas as conclusões inferidas com o desenvolvimento do trabalho e a perspectiva de desenvolvimento de trabalhos futuros.

8.1 Conclusão

Este trabalho apresentou a utilização de equações de diferenças finitas para resolução de problemas envolvendo a transferência de calor para um perfil metálico I em situação de incêndio. Para definir a influência do calor fornecido pelo ambiente em chamas ao perfil foram desenvolvidas curvas de incêndio baseadas nas normas brasileiras e europeias, utilizando-se de duas metodologias, a do incêndio padrão e a do incêndio natural. A utilização desses parâmetros foi implementada em um software desenvolvido pelos autores e designado como *IFire-Simulation*.

O *software* trouxe a possibilidade de realizar a análise da transferência de calor para a peça em diversas situações, podendo adaptar-se às dimensões da peça e do ambiente, às condições de ventilação, à temperatura ambiente e à utilidade funcional do local.

De modo geral, as equações de diferenças finitas mostraram uma boa adaptação para demonstrar a distribuição de calor no perfil I ao longo da duração do incêndio. Durante a simulação do galpão apresentada como exemplo de utilização do programa, foi observado que os nós nas extremidades das barras são as que mais sofrem aumento de temperatura, o grande motivo disso é seu contato direto com as correntes convectivas do ambiente e sua localização em uma quina que o faz receber influência nas duas faces.

As análises feitas via método do incêndio padrão demonstraram uma boa aproximação à curva gerada pelo incêndio natural porém, o método natural fornece resultados mais próximos à realidade, uma vez que a evolução da temperatura com o tempo ocorre de maneira mais lenta, quando comparada ao padrão, além de fornecer a temperatura máxima do incêndio sem necessitar de nenhum método auxiliar, e indicar a curva de resfriamento do incêndio quando considera-se que todo o material já foi consumido pelas chamas. Portanto, recomenda-se para uma análise mais detalhada e econômica do ponto de vista de gastos com proteção na peça estrutural, que a análise da curva de incêndio seja feita pelo método natural.

Com relação aos componentes do perfil I foi observado que a alma e a mesa inferior apresentaram as maiores temperaturas registradas, ao passo de que a mesa superior mostrou as menores temperaturas. O que é explicado pelo fato dos dois primeiros componentes estarem em contato com os gases quentes e a mesa superior estar recebendo calor apenas por condução, devido sua posição na análise.

As altas temperaturas registradas na alma do perfil alertam para uma perda da estabilidade global da peça, uma vez que ela tende a chegar ao seu limite de escoamento mais rápido, o que também é influência de sua esbeltez e acarreta o risco do seu rompimento durante o incêndio.

8.2 Trabalhos Futuros

Como perspectiva para trabalhos futuros propõe-se analisar a transferência de calor para a peça através de outros métodos matemáticos, como o método dos elementos finitos. Além da consideração da transferência de calor por radiação que não foi inserida no balanço de energia tratado neste trabalho.

Também entra nessa perspectiva evoluir o software para que ele possa analisar outros tipos de peças metálicas utilizadas para fins estruturais, além de realizar a análise em um modelo de três dimensões.

Propõe-se também evoluir o software ao ponto de que ele seja combinado ao dimensionamento de estruturas metálicas em situação de incêndio, conforme a norma brasileira "NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio, 2013".

Referências

- ABNT. *NBR 14432*: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações-procedimento. São Paulo, 2001. Citado 7 vezes nas páginas 18, 19, 42, 48, 49, 55 e 62.
- ABNT. *NBR5628*: Componentes construtivos estruturais - determinação da resistência ao fogo. [S.l.], 2001. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 42.
- ABNT. *NBR 14323*: Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio. São Paulo, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 77.
- ABNT. *NBR 15200*: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. São Paulo, 2012. Citado na página 78.
- AZEVEDO, M. *Estruturas de Aço sem revestimento contra fogo externa a edifícios em Incêndio*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- BBC, B. B. C. *Estrutura mista de concreto e aço contribuiu para que prédio em SP caísse mais rápido, diz especialista*. 2018. Disponível em: <<g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/estrutura-mista-de-concreto-e-aco-contribuiu-para-que-predio-em-sp-caisse-mais-rapido-diz-especialista.ghml>>. Citado na página 17.
- BOEIRA, A. *Tecnologia dos Metreiais*. Passo Fundo: Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas,RS, 2007. Citado na página 17.
- CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. *Manual de construção em aço: Galpões para usos gerais*. [S.l.], 2010. Citado na página 65.
- COHEN, M. *Materiais de Engenharia*. [S.l.: s.n.], 1997. Citado na página 17.
- COSTA, C.; SILVA, V. O método do tempo equivalente para o projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. In: . [S.l.]: Congresso brasileiro de concreto, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- COSTA, C.; SILVA, V. Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio. In: . São Paulo: Seminário Internacional de tecnologia e inovação em Arquitetura e Urbanismo, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *EUROCODIGO (1)*: Ações em estruturas- parte 1-2: Ações gerais- ações em estruturas expostas ao fogo. [S.l.], 2002. Citado 5 vezes nas páginas 19, 41, 42, 44 e 49.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *EUROCODIGO (3)*: Projeto de estruturas de aço- parte 1-2: Regras gerais- verificação da resistência ao fogo. [S.l.], 2010. Citado 7 vezes nas páginas 20, 27, 28, 29, 30, 31 e 32.
- FERRAZ, H. O aço na construção civil. *Revista Eletrônica de Ciências*, n. 22, Março 2005. Citado na página 17.

GILAT, A.; SUBRAMANIAM, V. *Métodos numéricos para engenheiros e cientistas*. [S.l.: s.n.], 2008. Citado na página 33.

INCROPERA, F. et al. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. [S.l.: s.n.], 2008. Citado 11 vezes nas páginas 19, 21, 22, 24, 25, 26, 33, 34, 37, 38 e 39.

LASKE, A.; IBRAHIM, B. Análise do comportamento de aços para estruturas de concreto armado em situação de incêndio. *3 SPPC*, 2018. Citado na página 77.

MARTINS, M. *Dimensionamento de Estruturas de Aço em Situação de Incêndio*. Dissertação (Mestrado) — UFMG, Belo Horizonte-MG, 2000. Citado 5 vezes nas páginas 21, 22, 23, 30 e 41.

MESQUITA, L. *Instabilidade termo-mecânica de vigas submetidas a temperaturas elevadas. Estudo numérico e experimental*. 148 p. Tese (Tese) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, Julho 2004. Citado 6 vezes nas páginas 27, 28, 29, 30, 31 e 32.

OLIVEIRA, P. *Transmissão de Calor - Transmissão em Regime Variável*. Covilhã-Portugal: [s.n.], 2014. Citado na página 39.

SILVA, V. *Estruturas de Aço em Situação de Incêndio*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. Citado na página 46.

SILVA, V.; MELÃO, A. Equivalência entre incêndio-padrão e curvas paramétricas aplicados a estruturas de aço. In: . São Paulo: Congresso Latino Americano da Construção Metálica, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 45, 47 e 49.

SOUSA, N. *Métodos de diferenças finitas: conceitos e interpretações*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Campinas-SP, 2009. Citado na página 33.

WANG, F.; LUI, E. Behavior of high strength steels under and after high temperature exposure: A review. *Journal of steel structures and construction*, 2016. Citado na página 77.