

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GUILHERME TALES ZORNITTA

**DESENVOLVIMENTO DE CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA OBTENÇÃO
DA RESISTÊNCIA DE VIGAS E PILARES DE AÇO EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO**

MARINGÁ
2019

GUILHERME TALES ZORNITTA

**DESENVOLVIMENTO DE CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA OBTENÇÃO
DA RESISTÊNCIA DE VIGAS E PILARES DE AÇO EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Estruturas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins
Coorientador: Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

MARINGÁ
2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

Z88d

Zornitta, Guilherme

Desenvolvimento de código computacional para obtenção da resistência de vigas e pilares de aço em situação de incêndio / Guilherme Zornitta. -- Maringá, PR, 2019.
81 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins.

Coorientador: Prof. Dr. Ronaldo Rigobello.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.

1. Incêndio. 2. Aço - Estrutura. 3. Engenharia de estrutura. 4. Análise Térmica. 5. Análise estrutural. I. Martins, Carlos Humberto, orient. II. Rigobello, Ronaldo, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 23.ed. 624.1

GUILHERME TALES ZORNITTA

**DESENVOLVIMENTO DE CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA OBTENÇÃO DA
RESISTÊNCIA DE VIGAS E PILARES DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre.

Aprovado em: 27/08/2019

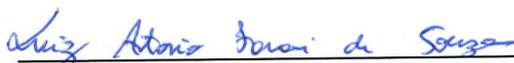
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Carlos Humberto Martins
Universidade Estadual de Maringá



Prof. Dr. Ronaldo Rigobello
Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Prof. Dr. Luiz Antonio Farani de Souza
Universidade Estadual de Maringá



Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Aos meus pais, Hermes e Cleuza, pelas oportunidades concedidas, apoio e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pelo amor deferido e pelas oportunidades concedidas ao longo desta jornada.

À minha família, pelo amor incondicional, apoio e incentivo no decorrer da minha vida.

À minha namorada, Victória, pelo amor, paciência, compreensão e incentivo durante a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Carlos Humberto e ao meu coorientador Ronaldo Rigobello, pela dedicação, incentivo e conhecimentos transmitidos.

E por fim, a todos os professores e colegas de curso que contribuíram direta ou indiretamente para a formação dos conceitos aplicados nesta dissertação.

“Sábio é aquele que conhece os limites da própria ignorância.”

(Sócrates)

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver uma ferramenta computacional para obtenção da resistência de vigas e pilares de aço em situação de incêndio por meio de análise numérica das seções transversais. A análise térmica da seção transversal é realizada por meio de modelos avançados via método dos elementos finitos para obtenção do campo de temperaturas na seção. A resistência dos elementos estruturais em questão é obtida por meio do método dos momentos plásticos resistentes e de normas brasileiras e europeias vigentes. Por fim, os resultados obtidos pelo programa foram comparados com resultados presentes na literatura e se mostraram muito próximos dos valores apresentados pelas referências utilizadas.

Palavras-chave: Incêndio. Estruturas de aço. Análise estrutural. Análise Térmica.

ABSTRACT

The present work aimed to develop a computer code to obtain the resistance of steel beams and columns in a fire situation through cross sections numerical analysis. The thermal analysis of the cross section is performed with advanced models using the finite element method to obtain the temperature field in the section. The strength of the structural elements in question is obtained through plastic moment capacity method and current Brazilian and European standards. Finally, the results obtained by the program were compared with results in the literature and were very close to values presented by the used references.

Key-words: Fire. Steel Structures. Structural Analysis. Thermal Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ensaio em escala real conduzido em um edifício de 8 (oito) pavimentos	21
Figura 2 – Vista de um dos pavimentos em sua configuração deformada após os ensaios	22
Figura 3 – Perda de resistência de materiais estruturais sujeitos a altas temperaturas.	23
Figura 4 – Perda de rigidez de materiais estruturais sujeitos a altas temperaturas.....	23
Figura 5 – Triângulo do Fogo	25
Figura 6 – Curva temperatura-tempo típica de um incêndio real	26
Figura 7 – Curva temperatura-tempo de um modelo de incêndio padrão.....	27
Figura 8 – Curvas nominais: a) Curva de hidrocarbonetos; b) Curva de incêndio padrão; c) Curva de incêndio para elementos exteriores	29
Figura 9 – Curva temperatura-tempo de um modelo de incêndio natural	30
Figura 10 – Convecção decorrente de um incêndio	33
Figura 11 – Radiação decorrente de um incêndio	34
Figura 12 – Condutividade térmica do aço em função da temperatura.....	35
Figura 13 – Calor específico do aço em função da temperatura	36
Figura 14 – Exemplos de diferentes exposições de calor em pilares	42
Figura 15 – Evolução de temperatura de uma viga de piso em situação de incêndio, considerando a curva de incêndio padrão	44
Figura 16 – Evolução de temperatura de uma viga de piso em situação de incêndio, considerando a curva de incêndio natural.....	44
Figura 17 – Exemplo de distribuição da malha de elementos finitos em um perfil “I”	45
Figura 18 – Distância do centro de gravidade do elemento finito até a posição da linha neutra	47
Figura 19 – Elementos finitos disponíveis para análises: (a) Elemento finito TT3, (b) Elemento finito TQ4 (c) Elemento finito TT10 e (d) Elemento finito TS2.....	52
Figura 20 – Interface do programa.....	54
Figura 21 – Processamento da análise térmica	55
Figura 22 – Armazenamento e interpretação dos resultados da análise térmica.....	56
Figura 23 – Obtenção da curva temperatura versus tempo nodal.....	56
Figura 24 – Procedimento para obtenção da resistência à flexão de um perfil em situação de incêndio	57

Figura 25 – Procedimento para obtenção da resistência à compressão de um perfil em situação de incêndio	58
Figura 26 – Fluxograma da Entrada de Dados do Programa.....	59
Figura 27 – Fluxograma da Execução do Programa.....	59
Figura 28 – Exemplo 1 – Perfil I exposto ao fogo em três lados.....	61
Figura 29 – Curva temperatura versus tempo do Exemplo 1	62
Figura 30 – Curva temperatura versus condutividade térmica do aço do Exemplo 1	63
Figura 31 – Curva temperatura versus calor específico do aço do Exemplo 1.....	63
Figura 32 – Curva temperatura versus fator de redução da resistência ao escoamento do aço do Exemplo 1	64
Figura 33 – Curva momento resistente versus tempo do Exemplo 1 – coeficiente de emissividade = 0,5	65
Figura 34 – Curva momento resistente versus tempo do Exemplo 1 – coeficiente de emissividade = 0,4	65
Figura 35 – Exemplo 2 – Perfil duplo U enrijecido exposto ao fogo em quatro lados	66
Figura 36 – Curva temperatura versus condutividade térmica do aço do Exemplo 2	67
Figura 37 – Curva temperatura versus calor específico do aço do Exemplo 2.....	67
Figura 38 – Curva temperatura versus fator de redução da resistência ao escoamento do aço do Exemplo 2	68
Figura 39 – Curva momento resistente versus tempo do Exemplo 2	69
Figura 40 – Exemplo 3 – Perfil duplo U enrijecido misto com laje de concreto exposto ao fogo em quatro lados	70
Figura 41 – Curva temperatura versus condutividade térmica do aço do Exemplo 3	71
Figura 42 – Curva temperatura versus condutividade térmica do concreto do Exemplo 3	71
Figura 43 – Curva temperatura versus calor específico do aço do Exemplo 3.....	72
Figura 44 – Curva temperatura versus calor específico do concreto do Exemplo 3.....	72
Figura 45 – Curva temperatura versus fator de redução da resistência ao escoamento do aço do Exemplo 3	73
Figura 46 – Curva momento resistente relativo versus tempo do Exemplo 3	74
Figura 47 – Exemplo 4 – Pilar Isolado exposto ao fogo em quatro lados	75
Figura 48 – Curva resistência relativa à compressão versus tempo do Exemplo 4	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fator de redução para a resistência ao escoamento de seções sujeitas a flambagem local.....	37
Tabela 2 - Valores das relações $f_{c,\theta}/f_{ck}$ e $E_{c,\theta}/E_c$ para concretos de massa específica normal (2.000 kg/m ³ a 2.800 kg/m ³) preparados com agregados predominantemente silicosos ou calcáreos.....	39

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEN	Comité Européu de Normalização
EN	European Normalization
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do perfil
C_w	Constante de empenamento da seção transversal
c_a	Calor específico do aço
c_c	Calor específico do concreto
E	Módulo de elasticidade longitudinal do aço a 20 °C
E_{θ}	Módulo de elasticidade longitudinal do aço a uma temperatura θ_a
f_y	Tensão de escoamento do aço a 20 °C
$f_{y,\theta}$	Tensão de escoamento do aço a uma temperatura θ_a
G	Módulo de elasticidade transversal do aço a 20 °C
I_x	Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo x
I_y	Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y
I_z	Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo z
$k_{E,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade longitudinal do aço em temperatura elevada relativo à temperatura ambiente
$k_{y,\theta}$	Fator de redução da tensão de escoamento do aço em temperatura elevada relativo à temperatura ambiente
$K_x L_x$	Comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo x
$K_y L_y$	Comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo y
$K_z L_z$	Comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo z
N_{cr}	Força axial de flambagem elástica crítica
N_{ex}	Força axial de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo x da seção transversal
N_{ey}	Força axial de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y da seção transversal
N_{ez}	Força axial de flambagem elástica por torção em relação ao eixo longitudinal z
N_{Res}	Resistência a compressão de pilares metálicos
p_a	Massa específica do aço
p_c	Massa específica do concreto
r_0	Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento
r_x	Raio de giração polar da seção transversal na direção x
r_y	Raio de giração polar da seção transversal na direção y
t	Tempo de duração do incêndio
ν	Coefficiente de poisson do material

λ	Índice de esbeltez reduzido do perfil em temperatura ambiente
λ_{θ}	Índice de esbeltez reduzido do perfil para uma temperatura θ
λ_a	Condutividade térmica do aço
λ_c	Condutividade térmica do concreto
θ_a	Temperatura do elemento de aço em situação de incêndio
θ_c	Temperatura do elemento de concreto em situação de incêndio
θ_g	Temperatura dos gases no interior do compartimento
γ	Coefficiente de ponderação das resistências
χ	Fator de redução da resistência à compressão de perfis axialmente comprimidos em situação de incêndio

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	17
1.1. METODOLOGIA.....	18
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	18
CAPÍTULO 2 - INCÊNDIO E AÇÕES TÉRMICAS EM ESTRUTURAS	20
2.1. ENGENHARIA DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS.....	20
2.2. PARTICULARIDADES DE UM INCÊNDIO	24
2.2.1. Curva temperatura-tempo de um incêndio real	26
2.2.2. Modelo de incêndio nominal	27
2.2.3. Modelo de incêndio natural	30
2.3. ANÁLISE TÉRMICA.....	31
2.4. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	32
2.4.1. Transferência de Calor por Condução	32
2.4.2. Transferência de Calor por Convecção.....	32
2.4.3. Transferência de Calor por Radiação.....	33
2.5. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	34
2.5.1. Propriedades do Aço.....	34
2.5.1.1. Condutividade térmica	35
2.5.1.2. Calor específico.....	35
2.5.1.3. Massa específica	36
2.5.1.4. Fator de redução da resistência ao escoamento.....	37
2.5.2. Propriedades do Concreto.....	38
2.5.2.1. Condutividade térmica	38
2.5.2.2. Calor específico.....	38
2.5.2.3. Massa específica	38
2.5.2.4. Fator de redução da resistência a compressão	38
CAPÍTULO 3 - PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO.....	40
3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DOS ASPECTOS NORMATIVOS	40
3.2. MODELOS SIMPLIFICADOS	41

3.3.	MODELOS AVANÇADOS	42
3.4.	MÉTODO DOS MOMENTOS PLÁSTICOS RESISTENTES	45
3.1.	CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PILARES METÁLICOS	48
3.2.	IMPLEMENTAÇÃO DA ROTINA DE CÁLCULO	50
3.2.1.	Entrada de dados do programa	51
3.2.2.	Interface do programa	53
3.2.3.	Fluxograma da rotina de cálculo.....	58
CAPÍTULO 4 - VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS		60
4.1.	EXEMPLO 1.....	60
4.2.	EXEMPLO 2.....	66
4.3.	EXEMPLO 3.....	69
4.4.	EXEMPLO 4.....	74
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		77
CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		78
REFERÊNCIAS		79

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

É de conhecimento geral que a propagação de incêndios pode causar grandes perdas de vidas humanas e patrimoniais. A engenharia de segurança contra incêndios tem como propósito minimizar esses riscos por meio de medidas de prevenção ou de proteção.

De acordo com Silva (2002), os elementos estruturais, quando sujeitos a altas temperaturas sofrem redução na sua resistência e rigidez, além do aparecimento de esforços adicionais em estruturas hiperestáticas. Desse modo, em estruturas com alto risco à vida humana, faz-se necessário a verificação da resistência ao fogo.

Para a maior parte das situações, a análise térmica das estruturas em situação de incêndio pode ser realizada por meio de modelos simplificados, que tratam a elevação de temperatura de maneira homogênea em toda a seção transversal, devido a sua facilidade de aplicação e eficácia em perfis de baixa espessura, que compreende grande parte dos perfis usuais de aço. Entretanto, para perfis mais espessos ou em contato com outros materiais, esse método pode conduzir a dimensionamentos conservadores ou mesmo contra a segurança.

Com o intuito de se obter uma análise térmica mais representativa da situação real, faz-se uso de modelos avançados para transferência de calor, usualmente elaborados através de programas computacionais devido ao grande esforço numérico exigido para a resolução do problema.

A grande maioria dos softwares de dimensionamento de estruturas em situação de incêndio possui custo elevado e com códigos fechados, dificultando tanto o acesso quanto a customização dos procedimentos de cálculo. Diante disso, percebe-se a necessidade de disponibilizar ao meio técnico um programa que auxilie na difusão das técnicas de segurança contra incêndio nas estruturas, além de uma ferramenta customizável para fins de pesquisa.

Este trabalho objetiva desenvolver uma ferramenta computacional simplificada para obtenção da resistência de vigas e pilares de aço em situação de incêndio, serão utilizados modelos avançados para transferência de calor, considerando o campo de temperaturas completo e a presença do gradiente térmico na seção transversal. Para tanto, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um código de cálculo para obtenção da resistência de vigas e pilares de aço a partir da análise térmica da seção transversal;
- Considerar a presença de gradiente térmico na seção de vigas e sua influência na resposta dos modelos e procedimentos numéricos simplificados;
- Validar os resultados obtidos confrontando com resultados presentes na literatura.

Com o intuito de estabelecer uma utilização prática do código desenvolvido, serão analisados perfis usuais em edificações de múltiplos pavimentos.

1.1. METODOLOGIA

Inicialmente será realizada uma revisão bibliográfica dos conceitos teóricos que fundamentam o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio. A principal base de estudo serão as normas brasileiras e europeias vigentes, bem como artigos e livros inerentes ao assunto.

Apresentada a revisão teórica do assunto, desenvolver-se-á um código de cálculo em Delphi para obtenção da resistência de vigas e pilares de aço. Posteriormente os resultados obtidos pelo programa serão comparados com resultados presentes na literatura.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em 5 capítulos, que serão descritos na sequência quanto ao seu conteúdo.

O capítulo 1 oferece uma breve introdução dos assuntos que serão abordados e a proposta desta dissertação.

O capítulo 2 discorre sobre a propagação de incêndios na construção civil e fundamenta os princípios das ações térmicas em estruturas, apresentando os diversos modelos de incêndio e os parâmetros estruturais considerados.

O capítulo 3 define os procedimentos de cálculo utilizados na implementação da rotina de cálculo que determina a resistência das seções transversais em situação de incêndio considerando o gradiente térmico da seção.

O capítulo 4 faz a validação dos resultados obtidos através da comparação com outros programas já existentes no mercado.

O capítulo 5 descreve as conclusões do trabalho e faz as considerações finais a respeito desta pesquisa.

CAPÍTULO 2 - INCÊNDIO E AÇÕES TÉRMICAS EM ESTRUTURAS

2.1. ENGENHARIA DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS

O fogo representa uma das ações naturais mais severas para as quais as obras de engenharia estão sujeitas, podendo conduzir a eventos catastróficos. Diante do risco apresentado por esses incidentes, surgiu a “engenharia de segurança contra incêndios”.

Segundo Purkiss (2007), a expressão “engenharia de segurança contra incêndios” pode ser definida como a aplicação de princípios da ciência e engenharia para situações de incêndio, a fim de reduzir as perdas de vidas humanas e danos ao patrimônio, quantificando os riscos e perigos envolvidos e prevendo medidas preventivas ou de proteção.

Nos cursos de engenharia civil ministrados no Brasil pouco se fala a respeito da segurança contra incêndio das estruturas. Em geral, o incêndio só é abordado nas universidades com relação ao PPCIP (Projeto de Prevenção e Combate a Incêndio e Pânico), que tem como objetivo principal proteger a integridade física das pessoas em caso de acidentes gerados pelo fogo. Dessa forma, a maioria dos profissionais acaba negligenciando as normas que tratam da resistência ao fogo das estruturas.

Na maioria das edificações são realizadas medidas de prevenção, como chuveiros automáticos, detectores de calor e fumaça, brigada de incêndio entre outros, com a finalidade de extinguir o incêndio em sua fase inicial. Segundo Silva (2004), para os casos onde essas medidas não são suficientes, deve-se considerar os efeitos das ações térmicas nas estruturas.

Silva (2004) relata que no passado as pessoas acreditavam que o incêndio era uma obra do acaso e que as vítimas eram infortunadas. Ele acrescenta que nos dias de hoje já se sabe que o incêndio é um evento controlável, e as vítimas ou perdas de patrimônio são resultados da ignorância ou de um ato criminoso.

De fato, as pesquisas relacionadas à segurança contra incêndio têm progredido bastante nos últimos anos, entretanto as normas de dimensionamento de estruturas de aço e concreto evoluíram significativamente mais, tornando o projeto estrutural uma das atividades mais complexas e trabalhosas da engenharia civil.

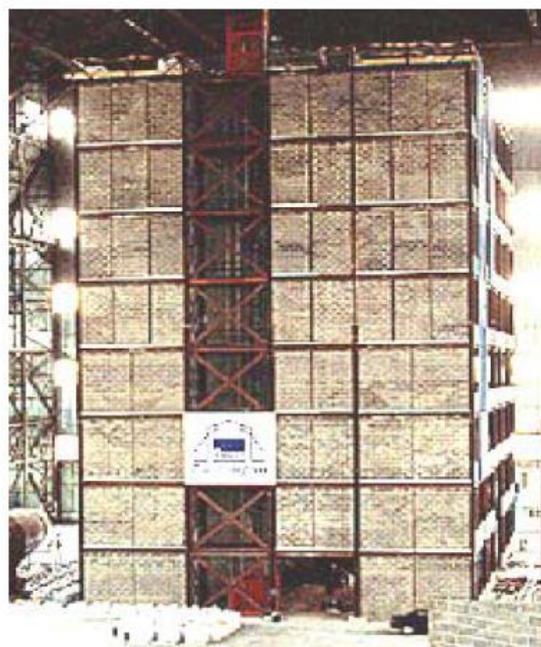
Aliado a isso tem-se prazos muito curtos para realização dos projetos, fazendo com que muitas vezes nem se cogite a possibilidade de verificar a estrutura em situação de incêndio.

Em se tratando de estruturas metálicas, sabe-se que o aço tem baixo desempenho quando sujeito a altas temperaturas. Entretanto, nos últimos anos a indústria da construção metálica tem se dedicado a aumentar a sua competitividade no mercado de edifícios altos. Segundo Vila Real (2003), as construções metálicas tiveram uma redução de 50% no seu custo total nas duas décadas que antecederam a publicação do autor.

Esse aumento de competitividade do aço no mercado tem preocupado a comunidade científica com relação à segurança contra incêndio das estruturas, despertando um desejo em conhecer melhor o comportamento deste material quando sujeito a temperaturas elevadas.

No final da década de 1990, essa preocupação com a resistência ao fogo dos edifícios em aço tomou grande proporção quando se realizou um ensaio em escala real em um edifício de 8 (oito) pavimentos no Laboratório Cardington, no Reino Unido. O prédio foi constituído de estrutura metálica mista, como um edifício de escritórios típico de múltiplos andares. A Figura 1 ilustra o ensaio, que foi realizado no ano de 1996.

Figura 1 – Ensaio em escala real conduzido em um edifício de 8 (oito) pavimentos



Fonte: Kirchhof (2004)

Nesse sistema estrutural concebido, de acordo Kirchhof (2004), foram realizados 4 (quatro) testes de incêndio executados em regiões diferentes da planta do edifício e em diferentes andares, a fim de investigar o comportamento dessa estrutura nessas situações.

Esse ensaio, que havia sido constituído de lajes em *steel deck* (lajes em concreto com formas metálicas que contribuem para a resistência), segundo Rigobello (2011), trouxe como maior contribuição a constatação de um efeito de membrana tracionada nas lajes, suportando todo ou parte do carregamento que antes era resistido pelas vigas. Isso se dá devido às grandes deformações dessas vigas de piso ao longo do incêndio, conforme demonstra a Figura 2.

Figura 2 – Vista de um dos pavimentos em sua configuração deformada após os ensaios



Fonte: Rigobello (2011)

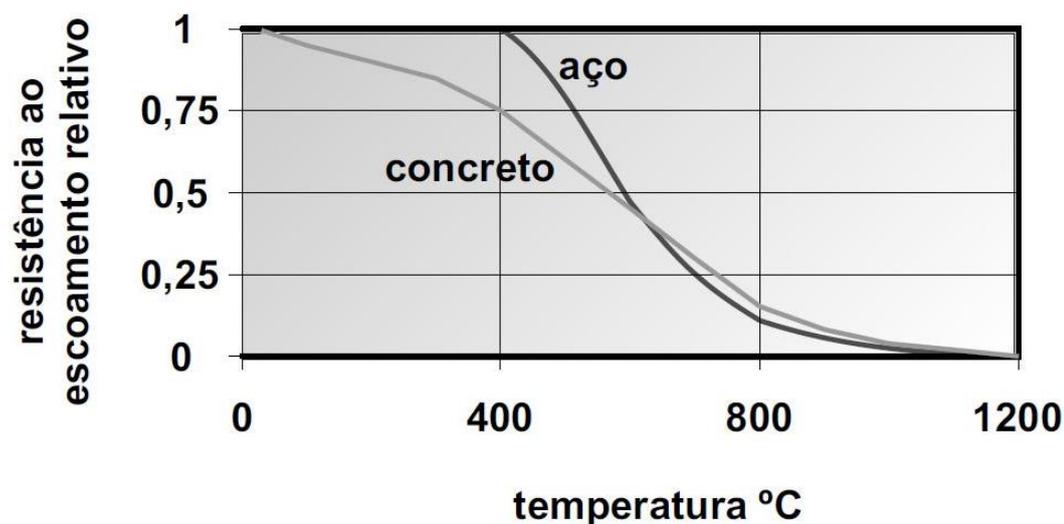
Hoje sabe-se que, no caso de estruturas hiperestáticas, quando o fogo afeta apenas parte de uma estrutura, ela atua como um todo, redistribuindo seus esforços a fim de garantir a estabilidade do sistema.

Com essa iniciativa no Laboratório Cardington, e a grande contribuição para a comunidade científica, com o passar dos anos foram realizados outros ensaios em escala real, porém em proporções menores e com objetivos mais específicos.

Apesar do impacto das ações térmicas nas estruturas, a verificação da resistência ao fogo em elementos estruturais, de acordo com a ABNT NBR 14.432: 2001, é isenta para a grande maioria das edificações. Dessa forma, muitos acabam por ignorar a sua necessidade nos casos em que ela é de fato indispensável.

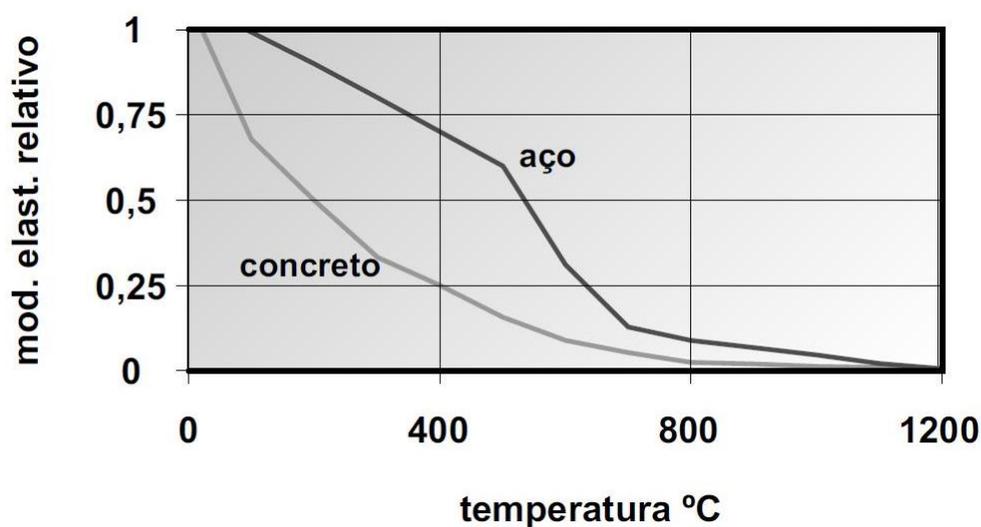
Pannoni (2015) descreve que todos os materiais estruturais, quando sujeitos a altas temperaturas, têm sua resistência e rigidez reduzidas significativamente, conforme apresentado na Figura 3 e na Figura 4 respectivamente. Para tanto, faz-se necessária a verificação da estrutura a fim de minimizar os riscos envolvidos.

Figura 3 – Perda de resistência de materiais estruturais sujeitos a altas temperaturas



Fonte: Vargas e Silva (2005)

Figura 4 – Perda de rigidez de materiais estruturais sujeitos a altas temperaturas



Fonte: Vargas e Silva (2005)

O motivo dessa perda de resistência e rigidez difere de material para material, no concreto por exemplo se deve a uma diversidade de fatores como calcinação superficial, movimentos de dilatação, retração estrutural, lascamentos, entre outros que caracterizam a desintegração dos componentes do material.

Além da perda de rigidez e resistência, de acordo com Agarwal, Choe e Varma (2014), os pilares de aço em situação de incêndio podem sofrer alguns efeitos e impactam diretamente em sua resistência, como o efeito de curvatura e o efeito de assimetria. Esses efeitos surgem quando ocorre o aquecimento não uniforme do pilar, normalmente em pilares de fachada expostos a incêndios no interior dos compartimentos do edifício, e em alguns casos é interessante verificá-los. Entretanto, esses efeitos não serão escopo deste trabalho, devido à análise ser realizada apenas nas seções transversais dos elementos.

Segundo Silva (2004), as estruturas de aço podem tanto serem projetadas para resistir em altas temperaturas, como também podem ser revestidas com materiais de proteção térmica, que são materiais com baixa condutividade térmica. No Brasil, as proteções térmicas mais utilizadas são: argamassas projetadas, tintas intumescentes, mantas, painéis de materiais fibrosos, placas de gesso acartonado e argamassa vermiculita.

As proteções térmicas evitam o contato direto do fluxo de calor com os elementos de aço, fazendo com que um material de baixa condutividade térmica primeiro absorva o calor (com menor intensidade quando comparado ao aço) e depois transmita por condução ao elemento estrutural.

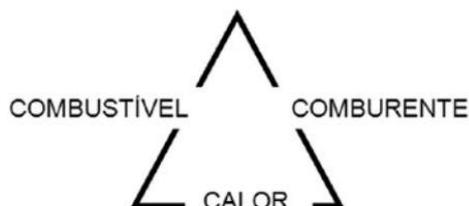
Em muitos casos é mais viável financeiramente adotar uma proteção térmica do que aumentar a seção dos pilares e vigas de um edifício para obter uma segurança contra incêndio aceitável na edificação.

2.2. PARTICULARIDADES DE UM INCÊNDIO

A deflagração de um incêndio normalmente se dá em uma região restrita da edificação, em geral devido a causas acidentais. O fogo pode ficar contido no compartimento onde o incêndio se iniciou, como também pode se estender a outras regiões da edificação, a depender das aberturas do compartimento, dos componentes de vedação, do grau de ventilação e a carga de combustível presente nessa região.

Para explicar melhor o que de fato faz com que se ocorra um incêndio, Seito et. al. (2008) relatam que inicialmente criou-se uma teoria conhecida como Triângulo do Fogo, que é composta por três materiais indispensáveis para que o fogo se mantenha: combustível, comburente e calor, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Triângulo do Fogo



Fonte: Seito et. al. (2008)

Atualmente, essa teoria foi reformulada, sendo conhecida como Tetraedro do Fogo, pois observou-se a necessidade de haver uma reação em cadeia para tornar o processo de queima autossustentável. Posto isto, os quatro elementos que formam esse tetraedro podem ser definidos da seguinte maneira:

- Combustível – substância oxidável (sólida líquida ou gasosa), que reage com o comburente em uma reação de combustão, liberando energia na forma de calor, chamas e gases;
- Comburente – material gasoso capaz de reagir com o combustível provocando a combustão;
- Calor – Energia mínima necessária para dar início ao processo de combustão;
- Reação em cadeia – Processo de sustentabilidade da combustão, que permite a realização de uma sequência de reações idênticas, que se repetem até que todo o combustível seja consumido.

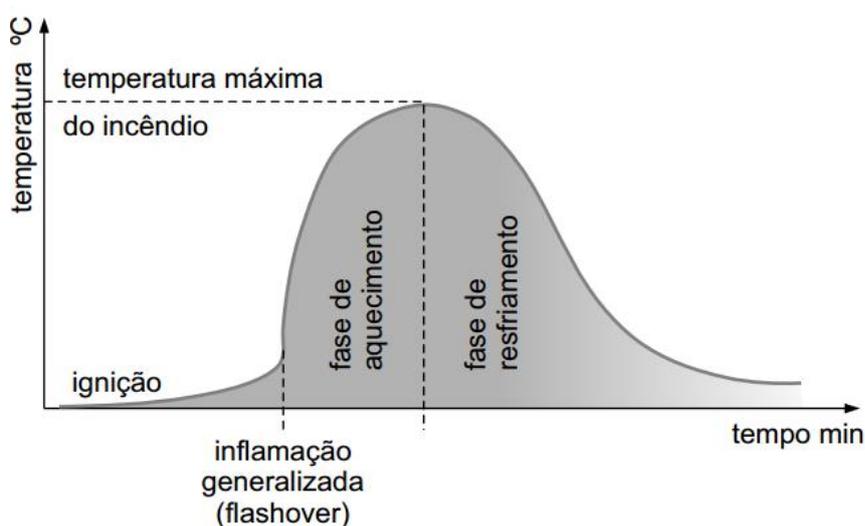
Em uma situação hipotética em que um incêndio é propagado ao se jogar um cigarro aceso em um palheiro, o palheiro é o combustível, o oxigênio presente no ar é o comburente e o fogo do cigarro representa o calor necessário para iniciar o incêndio. As características do ambiente por si só proporcionam a ocorrência de uma reação em cadeia, permitindo que essas reações se repitam até o consumo total do combustível.

Quanto à intensidade e à duração de um incêndio, Silva (2004) define três fatores que influenciam diretamente essas grandezas: a carga de incêndio (quantidade e tipo de material combustível), o grau de ventilação do compartimento e as características térmicas dos componentes de vedação. Apesar de tantos fatores influenciarem diretamente a evolução das temperaturas ao longo do tempo, existem algumas simplificações, baseadas em ensaios de laboratório, que apresentam resultados aceitáveis, conforme será apresentado na sequência.

2.2.1. Curva temperatura-tempo de um incêndio real

De acordo com Silva (2004), quando se refere ao estudo de estruturas, a principal característica de um incêndio é a curva que fornece a temperatura dos gases quentes em função do tempo de incêndio, uma vez que a partir dela pode-se obter o aumento de temperatura nas peças estruturais e conseqüentemente suas resistências e rigidezes nessas condições. Na Figura 6 é apresentada a curva temperatura-tempo típica de um modelo de incêndio real.

Figura 6 – Curva temperatura-tempo típica de um incêndio real



Fonte: Vargas e Silva (2005)

Conforme se observa na Figura 6, um incêndio é composto por três fases sucessivas, que, segundo Costa e Silva (2002), podem ser definidas da seguinte forma:

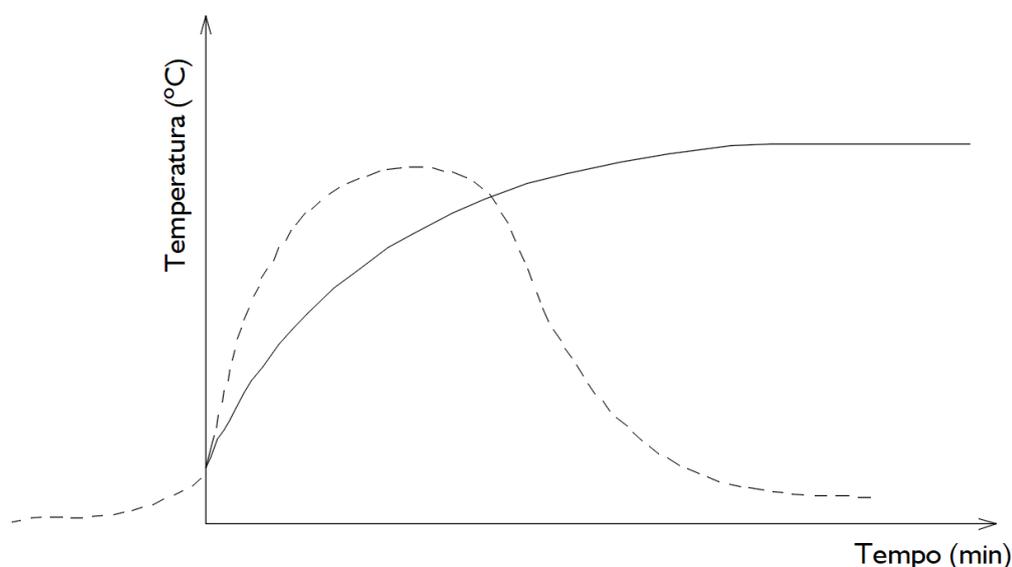
- Ignição – início da inflamação, que tem crescimento gradual de temperatura, com pouca influência das características do compartimento e sem risco de colapso estrutural. Essa fase termina no instante de inflamação generalizada denominado “*flashover*”.
- Fase de aquecimento – trecho caracterizado pelo crescimento repentino da temperatura após o “*flashover*”. Nessa fase todo o material combustível presente no compartimento entra em combustão.
- Fase de resfriamento – trecho caracterizado pela redução gradual da temperatura após a extinção de todo o material combustível presente no compartimento.

2.2.2. Modelo de incêndio nominal

As curvas de modelo de incêndio nominal, de acordo com Silva (2004), são curvas pré-definidas em que a temperatura dos gases respeita os valores padronizados para ensaio. Conforme pode-se observar na Figura 7, essa curva possui apenas um ramo ascendente, o que não ocorre em uma situação real de incêndio.

Esse modelo de incêndio é definido nas normas ABNT NBR 14.432: 2001, ISO 834-1: 1999, CEN EN 1993-1-2: 2005 e ASTM E119: 2000.

Figura 7 – Curva temperatura-tempo de um modelo de incêndio padrão



Fonte: Adaptado de Silva (2004)

Apesar de fácil aplicação, segundo Seito et. al. (2008), deve-se analisar cuidadosamente as conclusões obtidas através deste modelo, que deve ser empregado de acordo com o material combustível predominante no ambiente analisado. O autor ainda destaca que a sua aplicação requer a utilização do método TRRF (Tempo Requerido de Resistência ao Fogo) para determinação do tempo de resistência ao fogo.

De acordo com Vila Real (2003), existem três tipos de curvas de incêndio nominais, conforme apresentado nas equações (1), (2) e (3).

Curva de incêndio padrão, ISO 834:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

Curva de incêndio para elementos exteriores:

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (2)$$

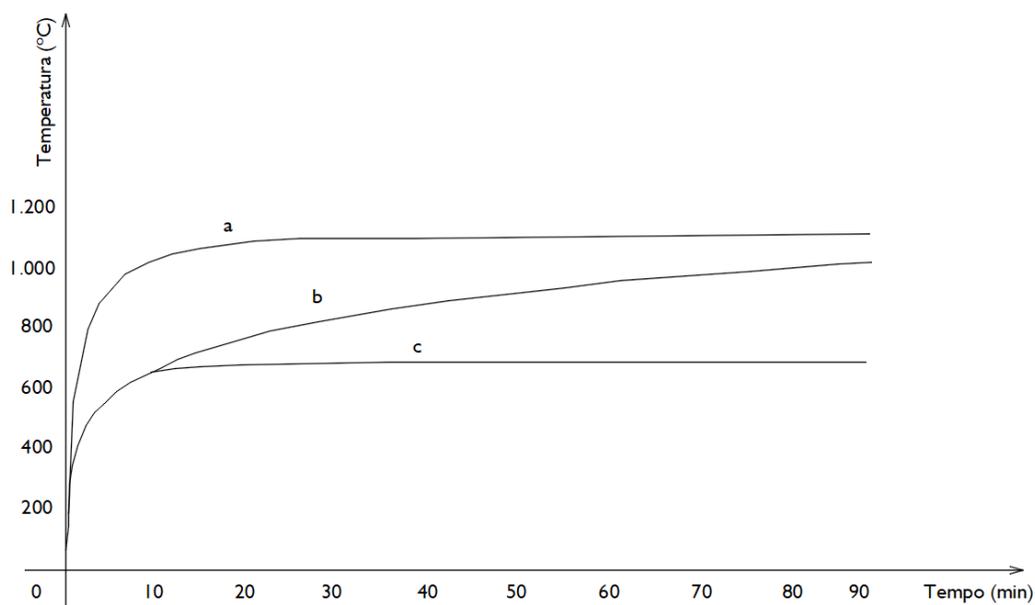
Curva de incêndio para hidrocarbonetos:

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (3)$$

Nas equações de (1) a (3), θ_g corresponde a temperatura dos gases no interior do compartimento em graus Celsius e t representa o tempo em minutos.

Na Figura 8 pode ser observado o comportamento destas três curvas, que visivelmente não possuem fase de ignição nem de resfriamento.

Figura 8 – Curvas nominais: a) Curva de hidrocarbonetos; b) Curva de incêndio padrão; c) Curva de incêndio para elementos exteriores



Fonte: Adaptado de Vila Real (2003)

Conforme se constata na Figura 8, a curva de hidrocarbonetos apresenta um incêndio muito mais severo do que os demais, sendo menos rigoroso o incêndio provocado em elementos exteriores à edificação. Por esse e outros motivos arquitetônicos sempre que possível os pilares são definidos na parte externa da edificação, em contato apenas com o elemento de vedação da construção.

Em uma situação intermediária temos a curva de incêndio padrão, que é a mais utilizada e empregada nos ensaios experimentais em fornos para determinação da resistência ao fogo de elementos estruturais.

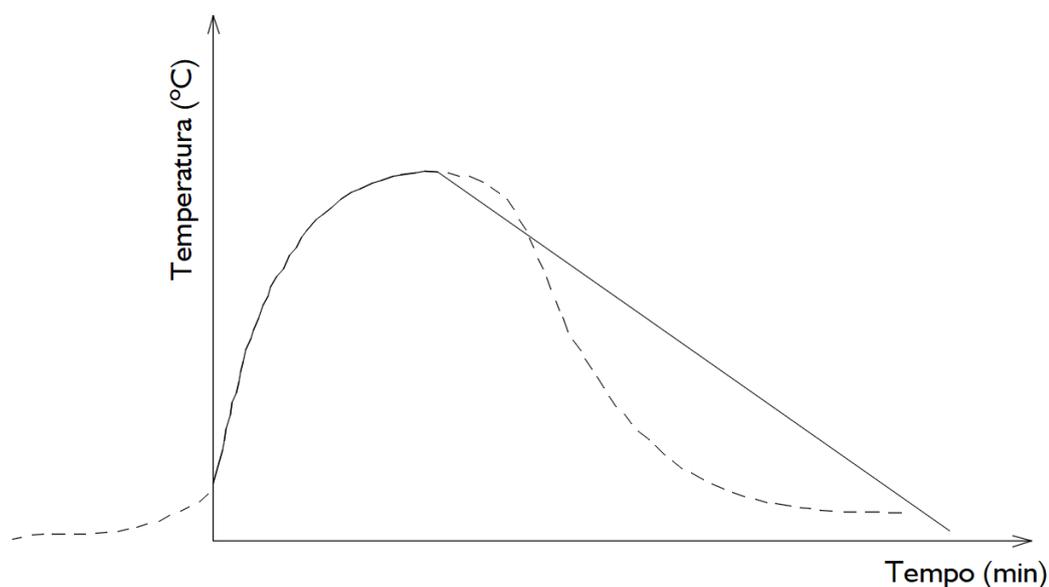
A curva de incêndio padrão ou ISO 834, apesar de ser pouco relacionada à realidade física, tem sido de grande importância para o meio técnico na comparação dos resultados obtidos em diversos ensaios feitos em laboratório de diferentes regiões do mundo.

2.2.3. Modelo de incêndio natural

De acordo com Silva (2004), as curvas de modelo de incêndio natural ou curvas parametrizadas têm por base ensaios que buscam simular situações reais de incêndio. A utilização deste modelo, ao contrário do modelo de incêndio padrão, requer a consideração da carga de incêndio, grau de ventilação e características térmicas dos componentes de vedação, o que torna o seu processo de implementação bem mais complexo que os demais, além de ser inconcebível em alguns casos devido à falta de informações cedidas ao projetista.

Conforme é demonstrado na Figura 9, este modelo se aproxima mais da curva temperatura-tempo de um incêndio real, possuindo um ramo ascendente e outro descendente, representando as fases de aquecimento e resfriamento respectivamente.

Figura 9 – Curva temperatura-tempo de um modelo de incêndio natural



Fonte: Adaptado de Silva (2004)

Esse modelo de incêndio é melhor representado na norma europeia CEN EN 1991-1-2: 2005 e representa um grande avanço no estudo do desenvolvimento das temperaturas em compartimentos em situação de incêndio.

2.3. ANÁLISE TÉRMICA

A análise térmica das estruturas em situação de incêndio consiste em estudar a variação de temperatura dos elementos estruturais ao longo do tempo, com o objetivo de determinar a influência dessas ações na resistência e rigidez do conjunto. De acordo com Pierin, Silva e La Rovere (2015), a análise térmica foi a primeira área não estrutural a utilizar o método dos elementos finitos para a modelagem de problemas de engenharia, assim como será feito neste trabalho.

Um dos estudos mais recentes sobre esse assunto foi elaborado por Pierin, Silva e La Rovere (2015), que desenvolveram um programa de análise térmica por meio de elementos finitos na linguagem FORTRAN, visando o estudo das temperaturas em elementos bidimensionais. O programa concebido foi intitulado ATERM.

O ATERM foi validado por meio de resultados obtidos no ANSYS e no STC, observando-se que os resultados apresentaram uma ótima correlação para todos os exemplos realizados.

Nessa pesquisa observou-se que uma mesma seção transversal, com diferentes malhas de elementos finitos, pode obter resultados surpreendentemente diferentes. Segundo os autores, é recomendado que se faça um estudo de malhas geométricas antes de se proceder com a análise térmica, caso contrário os resultados do programa podem não estar representando o comportamento físico.

A análise térmica utilizada neste trabalho de pesquisa, assim como será esclarecido no capítulo 3, parte de uma rotina já implementada por Rigobello (2007), o programa denominado CAT (Código de Análise Térmica) se assemelha ao ATERM, com a diferença de que sua entrada de dados dá mais liberdade ao usuário, permitindo que se calcule qualquer tipo de seção transversal. Enquanto o ATERM é composto por modelos de seções parametrizadas, fazendo com que o usuário se prenda a utilizar apenas as seções definidas pelos autores, o CAT permite a definição da geometria das seções através da inserção manual das coordenadas dos nós.

2.4. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

2.4.1. Transferência de Calor por Condução

A transferência de calor por condução se dá por meio da agitação das moléculas, que transmitem energia cinética para as moléculas vizinhas, sem se deslocar. Dessa forma, as moléculas mais energéticas (com maior temperatura) transmitem calor para as menos energéticas (com menor temperatura). Esse processo de transmissão de calor causado pela vibração das moléculas não é observado em escala macroscópica, diferente de outros métodos de transferência de calor.

Em geral, a condutividade térmica dos materiais tende a aumentar com o aumento da temperatura, no entanto quando a temperatura sobe a desordem das partículas se intensifica, o que tende a diminuir a condutividade térmica.

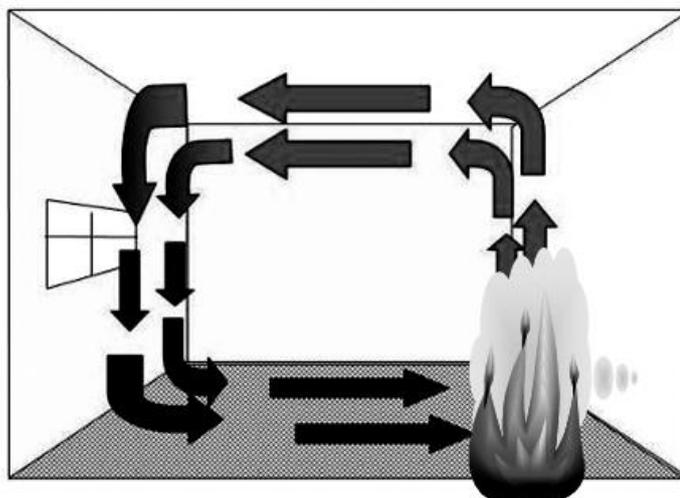
Em materiais cristalinos, que tem uma estrutura ordenada à temperatura ambiente, o aumento da temperatura acaba reduzindo a condutividade térmica, já em materiais sem estrutura atômica definida o efeito é o contrário, eles tendem a aumentar sua condutividade com o aumento da temperatura.

Materiais para proteção contra incêndio em geral são compostos por uma mistura em substâncias amorfas e cristalinas, desse modo o valor da condutividade térmica em altas temperaturas dependerá da porcentagem de cada uma dessas substâncias.

2.4.2. Transferência de Calor por Convecção

A convecção ocorre no interior de fluidos (gases ou líquidos), por consequência da diferença de densidade. Esse tipo de transferência de calor é observado comumente no interior de geladeiras, em que o refrigerador fica na parte superior, assim os gases quentes, que são menos densos, tendem a subir, formando as chamadas correntes de convecção. A Figura 10 ilustra o fluxo de calor por convecção em um compartimento em situação de incêndio.

Figura 10 – Convecção decorrente de um incêndio



Fonte: Seito et. al. (2008)

Além da diferença de temperatura, o fluxo de convecção depende de inúmeros fatores, tais como algumas propriedades físicas e térmicas do fluido (densidade, viscosidade, calor específico e condutividade térmica), a velocidade de deslocamento do fluido e as propriedades físicas e geométricas do corpo que está recebendo esse calor (forma, dimensões, rugosidade e natureza física do corpo).

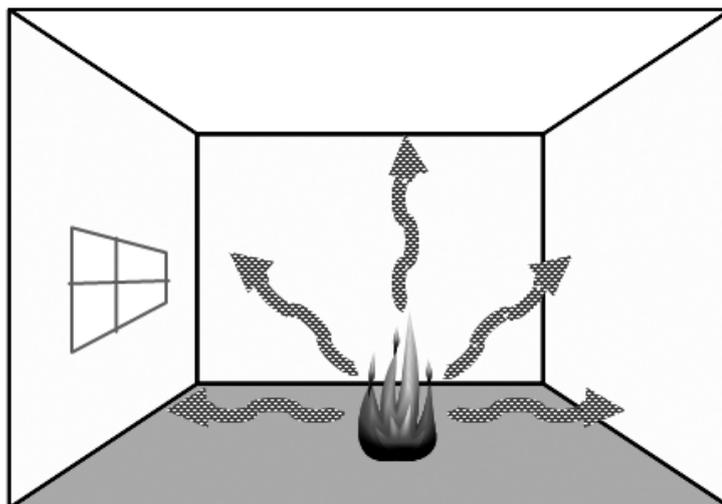
A convecção que ocorre em situações de incêndio é a chamada convecção natural, em que o fluxo de calor é constituído somente a partir da diferença de densidade dos gases quentes do compartimento. Entretanto é importante salientar que existe a convecção forçada, que é o exemplo do secador de cabelo, ventiladores ou dispositivos de sucção.

2.4.3. Transferência de Calor por Radiação

Também conhecida como irradiação, a transferência de calor por radiação é o principal mecanismo de transferência de calor e ocorre através de ondas eletromagnéticas, que não precisam de um meio material para se propagar, elas se propagam até mesmo no vácuo. Todos os corpos emitem uma radiação térmica proporcional a sua temperatura. Um exemplo dessa transferência de calor é o que ocorre entre o Sol e a Terra, que mesmo não estando em contato, o Sol irradia uma grande quantidade de calor, que se propaga no vácuo até aquecer a Terra.

A Figura 11 demonstra o fluxo de radiação de um compartimento em situação de incêndio.

Figura 11 – Radiação decorrente de um incêndio



Fonte: Seito et. al. (2008)

Segundo Wang (2002), a energia térmica de radiação pode ser absorvida, refletida ou transmitida pelo objeto em que incide, de acordo com sua natureza e geometria. Dessa maneira cada um desses fatores representa uma fração do fluxo de radiação, que tem total unitário.

2.5. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

A necessidade de uma verificação da resistência estrutural em situação de incêndio parte de uma mudança comportamental do sistema devido à alteração das propriedades físicas dos materiais. A previsão desse comportamento só é possível conhecendo as propriedades térmicas dos materiais, que correlacionam o comportamento físico mediante a alterações de temperatura.

Na sequência serão apresentadas as propriedades térmicas do aço e do concreto, bem como outras propriedades que serão utilizados neste trabalho.

2.5.1. Propriedades do Aço

As propriedades térmicas do aço, que variam em função da temperatura do material, são definidas pela NBR 14.323: 2013, que têm como base a norma europeia EN 1993-1-2: 2005.

2.5.1.1. Condutividade térmica

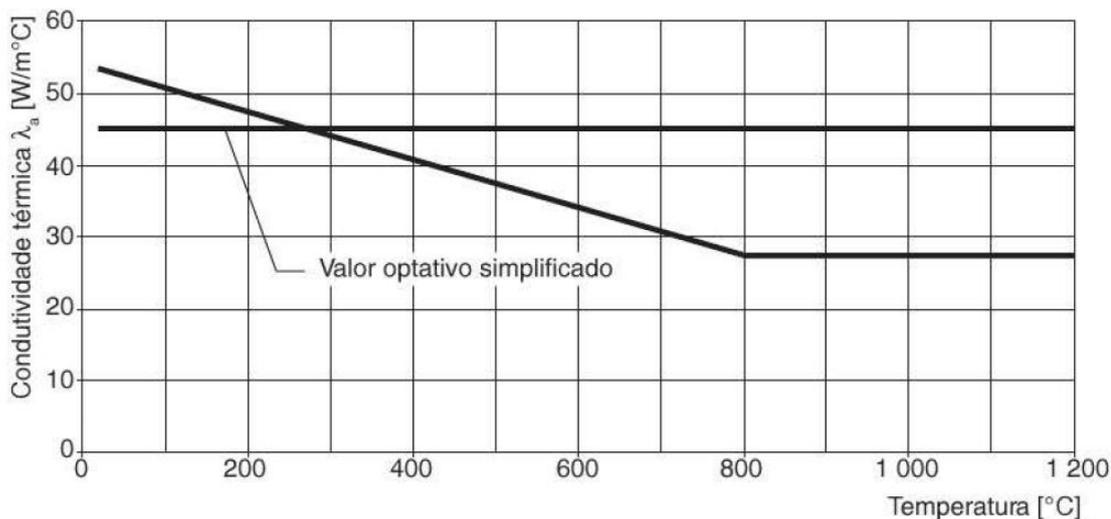
Segundo a NBR 14.323: 2013, a condutividade térmica do aço (λ_a) pode ser expressa em watts por metro e por grau Celsius ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$) conforme as correlações abaixo.

$$\lambda_a = \begin{cases} 54 - 3,3310^{-2}\theta_a & 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C} \\ 27,3 & 800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

Na equação (4), θ_a corresponde a temperatura do aço em graus Celsius.

A norma também permite que a condutividade térmica do aço seja adotada de forma simplificada, sem depender da temperatura do aço, no valor de $45 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{C}$. A Figura 12 demonstra variação da condutividade térmica do aço em função da temperatura.

Figura 12 – Condutividade térmica do aço em função da temperatura



Fonte: NBR 14.323 (2013)

2.5.1.2. Calor específico

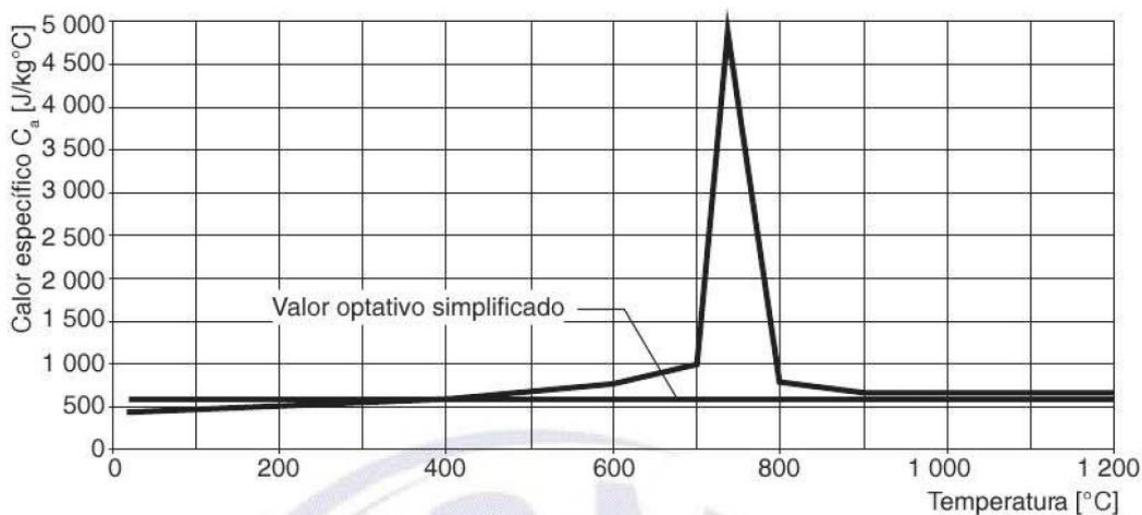
Segundo a NBR 14.323: 2013, o calor específico do aço (c_a) pode ser expresso em joules por quilograma e por grau Celsius ($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$) conforme as correlações abaixo.

$$c_a = \begin{cases} \text{para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}: \\ \quad 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3 \\ \text{para } 600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}: \\ \quad 666 + \frac{13.002}{738 - \theta_a} \\ \text{para } 735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}: \\ \quad 545 + \frac{17.820}{\theta_a - 731} \\ \text{para } 900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}: \\ \quad 650 \end{cases} \quad (5)$$

Na Equação (5), θ_a corresponde à temperatura do aço em graus Celsius.

A norma também permite que o calor específico do aço seja adotado de forma simplificada, sem depender da temperatura do aço, no valor de 600 J/kg°C. A Figura 13 demonstra variação do calor específico do aço em função da temperatura.

Figura 13 - Calor específico do aço em função da temperatura



Fonte: NBR 14.323 (2013)

2.5.1.3. Massa específica

Segundo a NBR 14.323: 2013, a massa específica do aço (ρ_a) pode ser adotada como 7.850 kg/m³ sem depender da temperatura do aço.

2.5.1.4. Fator de redução da resistência ao escoamento

Segundo a NBR 14.323: 2013, para uma taxa de aquecimento entre 2 °C/min e 50 °C/min, os fatores de redução da resistência ao escoamento de seções sujeitas a flambagem local ($k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$) e os fatores de redução do módulo de elasticidade do aço ($k_{E,\theta} = E_\theta/E$) podem ser determinados a partir da Tabela 1.

Tabela 1 – Fator de redução para a resistência ao escoamento de seções sujeitas a flambagem local

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fator de redução da resistência ao escoamento ^a $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Fator de redução do módulo de elasticidade ^a $k_{E,\theta} = E_\theta/E$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	0,900
300	1,000	0,800
400	1,000	0,700
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130
800	0,110	0,090
900	0,060	0,068
1.000	0,040	0,045
1.100	0,020	0,023
1.200	0,000	0,000

^a Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita a interpolação linear.

Fonte: NBR 14.323 (2013)

Na Tabela 1, θ_a corresponde a temperatura do aço em graus Celsius, enquanto $f_{y,\theta}$ representa a resistência ao escoamento do aço em situação de incêndio, f_y a resistência ao escoamento do aço em temperatura ambiente, E_θ representa o módulo de elasticidade do aço em situação de incêndio e E o módulo de elasticidade do aço em temperatura ambiente.

2.5.2. Propriedades do Concreto

As propriedades térmicas do concreto apresentadas neste trabalho se aplicam aos concretos de densidade normal com agregados silicosos ou calcários, que abrangem a maior parte dos concretos utilizados na construção civil. Os valores representados são os definidos pela NBR 15.200: 2004 e pela norma europeia EN 1994-1-2: 2005.

2.5.2.1. Condutividade térmica

A EN 1994-1-2: 2005 especifica o valor da condutividade térmica do concreto (λ_c) em Watts por metro por grau Celsius para concretos de densidade normal em temperaturas elevadas conforme a Equação (6).

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \left(\frac{\theta_c}{100} \right) + 0,0107 \left(\frac{\theta_c}{100} \right)^2 \rightarrow 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (6)$$

Na Equação (6), θ_c corresponde a temperatura do concreto em graus Celsius.

2.5.2.2. Calor específico

A EN 1994-1-2: 2005 especifica o valor do calor específico do concreto (c_c) em Joules por quilograma por grau Celsius para concretos de densidade normal e agregados silicosos ou calcários em temperaturas elevadas conforme a Equação (7).

$$c_c = \begin{cases} 900 & 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 100^\circ\text{C} \\ 900 + (\theta_c - 100) & 100^\circ\text{C} < \theta_c \leq 200^\circ\text{C} \\ 1000 + (\theta_c - 200)/2 & 200^\circ\text{C} < \theta_c \leq 400^\circ\text{C} \\ 1100 & 400^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (7)$$

Na Equação (7), θ_c corresponde a temperatura do concreto em graus Celsius.

2.5.2.3. Massa específica

Para cargas estáticas, a massa específica do concreto (ρ_c) pode ser considerada independente da temperatura do concreto e considerada de forma aproximada como 2.400 kg/m³.

2.5.2.4. Fator de redução da resistência a compressão

A NBR 15.200: 2004 especifica o fator de redução da resistência e rigidez para concretos de densidade normal de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Valores das relações $f_{c,\theta}/f_{ck}$ e $E_{c,\theta}/E_c$ para concretos de massa específica normal (2.000 kg/m³ a 2.800 kg/m³) preparados com agregados predominantemente silicosos ou calcáreos

Temperatura do concreto θ_c (°C)	Agregado silicoso		Agregado calcáreo	
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$
20	1,000	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000	1,000
200	0,950	0,900	0,970	0,940
300	0,850	0,720	0,910	0,830
400	0,750	0,560	0,850	0,720
500	0,600	0,360	0,740	0,550
600	0,450	0,200	0,600	0,360
700	0,300	0,090	0,430	0,190
800	0,150	0,020	0,270	0,070
900	0,080	0,010	0,150	0,020
1.000	0,040	0,000	0,060	0,000
1.100	0,010	0,000	0,020	0,000
1.200	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: NBR 15.200 (2004)

Na Tabela 2, θ_c corresponde a temperatura do concreto em graus Celsius, enquanto $f_{c,\theta}$ representa a resistência a compressão do concreto em situação de incêndio e f_{ck} a resistência característica a compressão do concreto em temperatura ambiente. Da mesma forma a variável $E_{c,\theta}$ representa o módulo de elasticidade do concreto em situação de incêndio e E_c o módulo de elasticidade do concreto em temperatura ambiente.

CAPÍTULO 3 - PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO

3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DOS ASPECTOS NORMATIVOS

O histórico de exigências de segurança contra o incêndio se inicia e é alavancado a partir de ocorrências isoladas de grande comoção internacional. Assim como em outras áreas da engenharia, a preocupação com o incêndio em estruturas só surgiu quando apareceram as primeiras vítimas.

Em um contexto internacional, as primeiras exigências de segurança contra incêndio surgiram no ano de 1666 devido a um grande incêndio que ocorreu na cidade de Londres, na Inglaterra. Quando se pensa em ocorrências de incêndio nos dias de hoje, imagina-se um prédio ou uma casa que pegou fogo, entretanto, o que ocorreu em Londres foi a destruição de praticamente um terço da cidade. Devido a estrutura medieval das casas na época, o fogo, que se iniciou em uma padaria, se alastrou com muita facilidade.

Após essa catástrofe, os pesquisadores iniciaram os trabalhos em busca de uma maior segurança nas estruturas sujeitas a incêndios, porém as primeiras normas e recomendações vieram a surgir apenas 245 anos depois, em 1911, estabelecida pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e denominada *Standard Tests for Fireproofs Constructions*.

Alguns anos depois, partindo do exemplo americano, os europeus estabeleceram suas primeiras diretrizes normativas abordando esse assunto. O instituto britânico BSI (*British Standard Institution*) publicou em 1932 a *BS 476: Fire Tests on Buildings, Materials and Structures*, que tem por base ensaios de elementos estruturais em fornos especiais.

No Brasil, os regulamentos para estruturas em situação de incêndio começaram a surgir apenas nos anos 1970, quando foram criadas a maioria das normas que utilizamos atualmente, impulsionadas por uma série de incêndios que ocorreram no país neste período.

Essas normas, em geral, foram adaptações feitas de normas estrangeiras para os conceitos de dimensionamento utilizados no território brasileiro.

Na sequência, na década de 1980 apareceram os primeiros códigos normativos europeus, os Eurocódigos, elaborados pelo Instituto Europeu de Normalização.

Atualmente as normas europeias de referência em segurança contra incêndios são: EN 1991-1-2: 2002, EN 1993-1-2: 2005, e EN 1994-1-2: 2005 que tratam respectivamente das ações em estruturas expostas ao fogo, do dimensionamento de estruturas de aço expostas ao fogo e do dimensionamento de estruturas de concreto expostas ao fogo.

Com o surgimento de diretrizes e exigências relacionadas à segurança contra incêndio, na década de 1990, houve um grande esforço por parte dos fabricantes de estrutura metálica no sentido de melhorar a eficiência dos dimensionamentos contra incêndio e garantir a competitividade do aço no mercado da construção civil.

Em 1994 o Corpo de Bombeiros publicou a Instrução Técnica IT-CB-0233/94 determinando o tempo requerido de resistência ao fogo para diversos tipos de estruturas em aço.

Atualmente as normas brasileiras que regem o dimensionamento das estruturas em situação de incêndio são: NBR 14.432: 2001, NBR 15.200: 2004 e NBR 14.323: 2013 que tratam respectivamente da resistência ao fogo de elementos construtivos em edificações, do projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio e do projeto de estruturas mistas e de aço em situação de incêndio.

3.2. MODELOS SIMPLIFICADOS

Os modelos simplificados de cálculo definidos em ABNT NBR 14323: 2013 e CEN EN 1993-1-2: 2005 tratam a variação de temperatura das estruturas de maneira uniforme, considerando a temperatura das extremidades da seção transversal igual a sua temperatura interna.

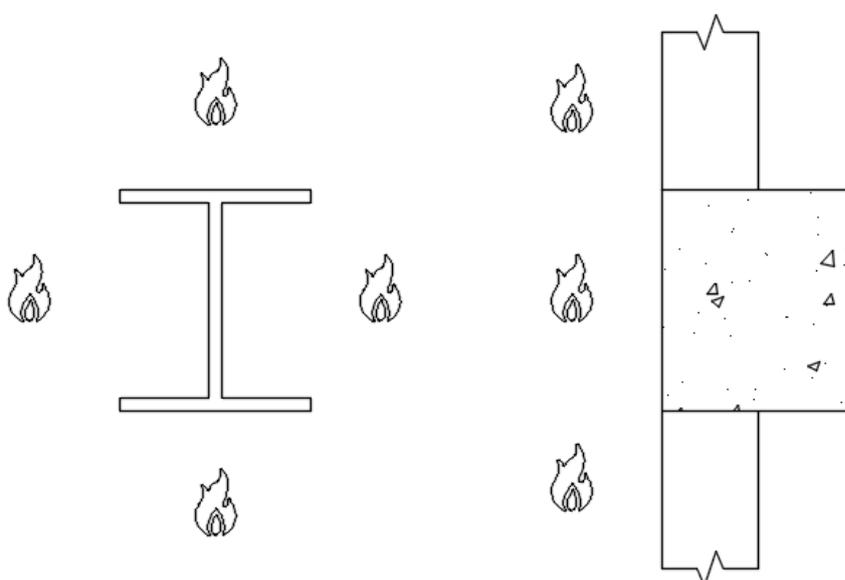
O nome dado a esse modelo de cálculo se deve a sua fácil aplicação, que demanda pouco esforço numérico, porém ele se mostra conservador na grande maioria das situações.

De acordo com Rigobello (2011), essa hipótese de temperatura homogênea ao longo da seção transversal apresenta resultados coerentes na maioria dos perfis de aço usuais, onde a condução de calor dentro de um objeto não difere significativamente da transferência de calor total na superfície.

A previsão desse comportamento em uma seção transversal depende de diversos fatores como a espessura das chapas que compõe o perfil, os coeficientes de transferência de calor e a condutividade térmica do material.

A Figura 14 apresenta dois exemplos de pilares em situação de incêndio onde percebe-se uma grande diferença na exposição ao calor das seções transversais. No exemplo em questão, o pilar em aço perfil “I” exposto pelo fogo em todo seu entorno é um exemplo clássico em que se poderia considerar um aquecimento uniforme da seção, enquanto para o pilar de fachada em concreto a utilização de métodos avançados de dimensionamento provavelmente levaria a resultados mais representativos da situação real.

Figura 14 - Exemplos de diferentes exposições de calor em pilares



Fonte: o próprio autor

As normas brasileiras atualmente em vigor possuem em seu escopo o cálculo das temperaturas dos elementos estruturais através de métodos simplificados, considerando o aquecimento uniforme da seção transversal dos elementos. No entanto, apesar desse conceito parecer ser a favor da segurança, de acordo com Rigobello (2007), em alguns casos esses métodos podem trazer resultados equivocados que colocam em risco a estrutura.

3.3. MODELOS AVANÇADOS

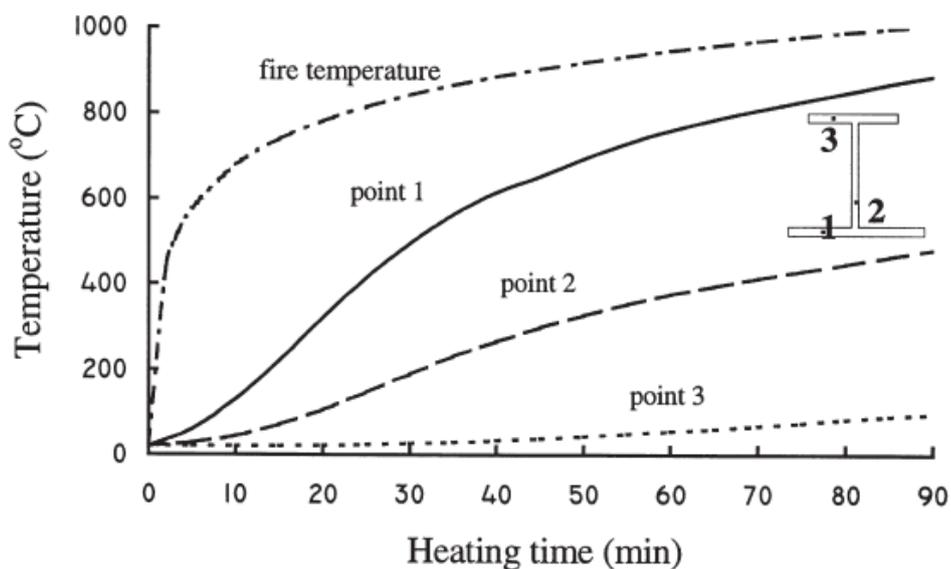
A utilização de modelos avançados consiste em analisar a seção transversal dos elementos estruturais considerando a variação de temperatura de maneira não uniforme, obtendo assim o campo térmico que mais se aproxima à situação real e torna o projeto mais econômico e seguro.

Para Franssen, Kodur e Zaharia (2009) o principal ponto a se levar em consideração quando se dimensiona utilizando um modelo de cálculo avançado é entender as limitações e as capacidades do modelo, que pode variar dependendo de cada caso. Os autores enfatizam que programar um método de cálculo simples em um computador para facilitar a sua utilização não transforma esse método em um método avançado de cálculo.

Os métodos de cálculo avançados são usualmente utilizados para analisar a estrutura como um todo, simulando de maneira mais real o comportamento da edificação em uma situação de incêndio. Apesar disso, o foco deste trabalho está na análise da resistência das seções transversais dos elementos, desconsiderando, a princípio, o comportamento global da estrutura.

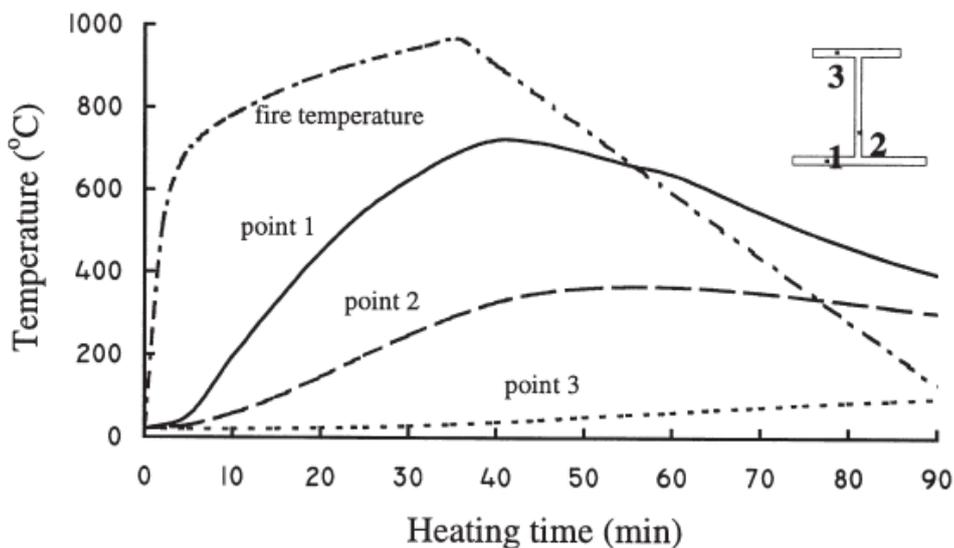
Makelainen e Ma (2000) analisaram vigas de pisos em estrutura mista sujeitos a incêndio considerando a presença do gradiente térmico por meio de modelos avançados de cálculo, e perceberam que a evolução de temperatura nos pontos mais próximos a fonte de calor (na face inferior dos perfis) era significativamente maior. A Figura 15 e a Figura 16 apresentam a evolução de temperatura de 3 (três) pontos diferentes da seção transversal de uma determinada viga de piso exposta ao fogo em um intervalo de 90 (noventa) minutos, sendo a primeira considerando a curva de incêndio padrão e a segunda considerando a curva de incêndio natural.

Figura 15 – Evolução de temperatura de uma viga de piso em situação de incêndio, considerando a curva de incêndio padrão



Fonte: Makelainen e Ma (2000)

Figura 16 – Evolução de temperatura de uma viga de piso em situação de incêndio, considerando a curva de incêndio natural

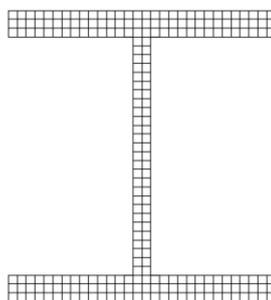


Fonte: Makelainen e Ma (2000)

3.4. MÉTODO DOS MOMENTOS PLÁSTICOS RESISTENTES

Neste trabalho, uma das situações que serão analisadas é o momento resistente de vigas de aço sujeitas à situação de incêndio considerando o gradiente térmico da seção transversal. O método dos momentos plásticos resistentes, apresentado por Makelainen e Ma (2000) parte da divisão da seção transversal em uma malha de elementos finitos, seguida do cálculo da distribuição de temperatura do perfil. A Figura 17 demonstra um exemplo de distribuição da malha de elementos finitos para um perfil “I”.

Figura 17 – Exemplo de distribuição da malha de elementos finitos em um perfil “I”



Fonte: o próprio autor

Não existe um padrão pré-definido para se determinar a quantidade de divisões ideal a ser considerada na malha de elementos finitos, entretanto esse fator influencia bastante na confiabilidade dos resultados.

Quanto mais subdividida a malha, ou seja, quanto maior a quantidade de elementos finitos, mais o resultado se aproxima da realidade física, em contrapartida o tempo de processamento dos dados no programa de cálculo aumenta significativamente.

De uma maneira iterativa, analisando os resultados obtidos, o que se percebe é que à medida em que se subdivide os elementos finitos, chega em um determinado ponto em que os resultados tendem a convergir, não sendo necessário novas subdivisões.

Após a determinação da malha de elementos finitos do perfil, deve-se determinar a posição da linha neutra da seção. Sabe-se que um perfil sujeito à flexão simples possui uma parcela de sua seção comprimida, e a outra tracionada.

Vale ressaltar que neste trabalho não será abordado o cálculo do campo de temperaturas da seção transversal, uma vez que já foi implementado na rotina de cálculo por Rigobello (2011), entretanto as temperaturas obtidas serão utilizadas na determinação da resistência do perfil.

Partindo da análise térmica da seção transversal, tem-se o conhecimento das temperaturas em cada elemento finito ao longo da seção, assim pode-se determinar a posição da linha neutra da seção, para definir quais elementos estão comprimidos, e quais estão tracionados.

A posição da linha neutra plástica (LN) é determinada de forma iterativa, adotando-se posições arbitrárias até que a Equação (8) seja satisfeita.

$$T + C = 0 \quad (8)$$

Na Equação (8), T representa o somatório da resistência dos elementos tracionados e C o somatório correspondente aos elementos comprimidos.

No caso de momentos positivos, os elementos que estiverem abaixo da posição da linha neutra estarão tracionados, e os demais comprimidos. O contrário ocorre para momentos negativos. Portanto, adota-se a posição da linha neutra, até que a resistência dos elementos comprimidos se iguale a resistência dos elementos tracionados, obedecendo o equilíbrio de forças.

O cálculo das resistências à tração e compressão se dá a partir das equações (9) e (10), respectivamente.

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{k_i f_i}{\gamma_i} A_i \quad (9)$$

$$C = \sum_{i=1}^m \frac{k_i f_i}{\gamma_i} A_i \quad (10)$$

Na Equação (9), n representa o número de elementos finitos que estão tracionados, e na Equação (10), m representa o número de elementos finitos comprimidos. Os valores de k fazem referência ao fator de redução associado à temperatura média de cada elemento, enquanto os valores de f representam a resistência à tração ou à compressão do elemento, conforme o esforço atuante. A variável γ simboliza o coeficiente de ponderação das resistências, que é tomado como valor unitário para situação de incêndio. Já a variável A faz referência à área do elemento finito analisado.

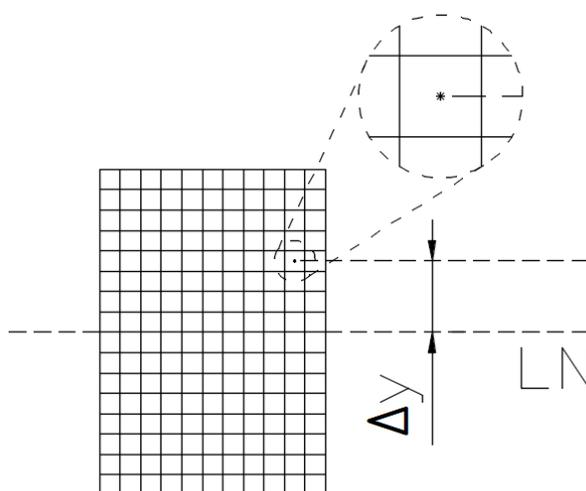
Nota-se que, para uma viga simétrica e composta apenas por um material, caso os valores de k fossem iguais (à temperatura ambiente por exemplo k tem valor unitário), a linha neutra estaria posicionada no centro geométrico do perfil. Entretanto, sabe-se que o valor de k é reduzido conforme a temperatura aumenta em cada elemento finito da seção transversal, fazendo com que exista apenas uma posição para a linha neutra que satisfaça a Equação (8). Deste modo, para uma situação de aquecimento não uniforme, a linha neutra nunca estará no centro geométrico do perfil.

Após a determinação da posição da linha neutra, pode-se calcular o momento resistente da seção transversal para a situação de incêndio a partir da Equação (11).

$$M_{Res} = \sum_{i=1}^{n+m} \frac{k_i f_i}{\gamma_i} A_i \Delta y_i \quad (11)$$

Na Equação (11), o valor de Δy de cada elemento finito corresponde à distância do centro de gravidade do elemento até a posição da linha neutra, conforme exemplificado na Figura 18.

Figura 18 – Distância do centro de gravidade do elemento finito até a posição da linha neutra



Fonte: o próprio autor

3.1. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PILARES METÁLICOS

A resistência à compressão de pilares metálicos (N_{res}) é definida na norma europeia CEN EN 1993-1-1: 2005 de acordo com a Equação (12), para uma temperatura uniforme θ_a na seção transversal.

No presente trabalho, o lambda reduzido é calculado para o pilar inteiro, e posteriormente a normal resistente é calculada para cada elemento finito, com sua respectiva temperatura. Calculando-se a resistência a compressão de cada elemento finito, faz-se o somatório para obter a resistência total da seção.

$$N_{Res} = \frac{\chi k_{y,\theta} A f_y}{\gamma} \quad (12)$$

Na Equação (12), o valor de χ corresponde ao fator de redução da resistência à compressão de perfis axialmente comprimidos em situação de incêndio. Esse fator de redução é obtido a partir da Equação (13).

$$\chi = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \lambda_\theta^2}} \quad (13)$$

Na Equação (13), o valor da incógnita φ_θ não tem um significado real, é apenas utilizada para simplificar o cálculo de χ , e pode ser definida através da Equação (14). Já o valor de λ_θ corresponde ao índice de esbeltez reduzido para uma temperatura θ .

$$\varphi_\theta = 0,5[1 + \alpha(\lambda_\theta - 0,2) + \lambda_\theta^2] \quad (14)$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235/f_y} \quad (15)$$

O cálculo de λ_θ é realizado a partir da Equação (16) para cada elemento finito do perfil, de acordo com a temperatura em um determinado tempo t .

$$\lambda_\theta = \lambda [k_{y,\theta}/k_{E,\theta}]^{0,5} \quad (16)$$

Na Equação (16) a letra grega λ corresponde ao índice de esbeltez reduzido do perfil em temperatura ambiente, enquanto os fatores $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ representam o fator de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade longitudinal respectivamente. Esses dois fatores podem ser obtidos na Tabela 1 de acordo com a temperatura do elemento.

O cálculo do índice de esbeltez reduzido do pilar λ para seções com dupla simetria ou simétricas em relação a um ponto é definido na ABNT NBR 8.800: 2008 de acordo com a Equação (17). Por se tratar do comportamento do pilar como um todo em situação de flambagem, diferentemente dos outros cálculos, este é realizado para o pilar inteiro, e não para cada elemento finito analisado.

$$\lambda = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad (17)$$

Na Equação (17) o valor de A faz referência a área da seção transversal do perfil e N_{cr} a força axial de flambagem elástica crítica, que pode ser determinada pelo menor dos três valores das Equações (18), (19) e (20).

Para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (18)$$

Para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia y da seção transversal:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (19)$$

Para flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GI_z \right] \quad (20)$$

Nas Equações (18), (19) e (20) o valor de E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal do aço em temperatura ambiente, enquanto a variável G representa o módulo de elasticidade transversal do aço em temperatura ambiente e pode ser calculado a partir da Equação (21).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (21)$$

O valor de ν refere-se ao coeficiente de poisson do aço, que tem valor aproximado de 0,3.

Ainda nas Equações (18), (19) e (20) as variáveis $K_x L_x$, $K_y L_y$ e $K_z L_z$ fazem referência ao comprimento de flambagem dos pilares em torno dos eixos x , y e z , respectivamente. Da mesma maneira os momentos de inércia em torno de cada eixo são representados por I_x , I_y e I_z . A variável C_w é a constante de empenamento da seção transversal, e assim como os comprimentos de flambagem e os momentos de inércia da seção, essas variáveis entram já calculadas nos dados de entrada do programa.

A incógnita r_0 refere-se ao raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento, e é calculada de acordo com a Equação (22) para elementos onde o centro de cisalhamento coincide com o centro geométrico da seção transversal.

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2)} \quad (22)$$

Na Equação (22) os valores de r_x e r_y correspondem ao raio de giração polar da seção transversal nas direções x e y , respectivamente, e podem ser calculados de acordo com as Equações (23) e (24).

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (23)$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (24)$$

3.2. IMPLEMENTAÇÃO DA ROTINA DE CÁLCULO

A rotina de cálculo foi implementada em um programa já existente, desenvolvido na pesquisa de Rigobello (2011) que trata do desenvolvimento e aplicação do código computacional para análise de estruturas de aço aporticadas em situação de incêndio.

O programa elaborado pelo autor para fins de análise térmica, intitulado CAT (Código de Análise Térmica), teve como escopo a determinação da temperatura das seções transversais em situação de incêndio considerando o gradiente térmico da seção. Desta forma, determina-se a temperatura de todos os pontos da seção transversal, que é discretizada em elementos finitos, ao longo do tempo de duração do incêndio.

Partindo dessas temperaturas calculadas no elemento finito discretizado, é que se realiza o cálculo da resistência à flexão da seção ao longo do tempo, que é escopo deste trabalho.

O código de cálculo foi desenvolvido em linguagem Object Pascal por meio da plataforma Embarcadero Delphi *Academic Edition*, com a entrada e saída de dados feita por documentos de textos em blocos de notas. O programa elaborado carrega a mesma nomenclatura CAT, por se tratar de um complemento ao programa existente, sem alterações no código já desenvolvido anteriormente.

3.2.1. Entrada de dados do programa

A entrada de dados disponibilizada no programa de cálculo dá bastante liberdade ao usuário, a fim de possibilitar o seu uso para uma grande variedade de situações.

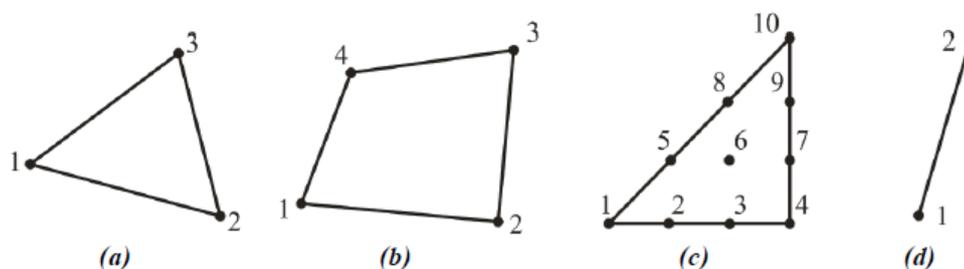
A geometria da seção transversal é introduzida por meio da definição de todos os nós juntamente com sua posição no plano cartesiano X e Y. A partir desses nós são definidos todos os elementos finitos da seção, estabelecendo os nós de contorno do elemento e o material pelo qual é composto.

Sabe-se que para definir todos os nós e elementos de uma determinada seção transversal é necessário muito esforço e tempo, levando isso em consideração, a entrada de dados do programa foi desenvolvida em um padrão compatível com os dados extraídos do ANSYS. Assim, recomenda-se que se faça a modelagem geométrica da seção transversal primeiramente no ANSYS, e depois a importação desses dados para o CAT. Neste trabalho foi utilizado o ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 19.0.

Segundo Rigobello (2011) existem quatro tipos de elementos finitos que podem ser considerados para análise térmica bidimensional, os elementos isoparamétricos TT3 (elemento térmico triangular de 3 nós), o TQ4 (elemento térmico quadrilateral de 4 nós), o TT10 (elemento térmico triangular de 10 nós) e o elemento TS2 (elemento térmico de dois nós e efeito de superfície, como convecção e radiação).

A Figura 19 apresenta os elementos finitos mencionados.

Figura 19 – Elementos finitos disponíveis para análises: (a) Elemento finito TT3, (b) Elemento finito TQ4 (c) Elemento finito TT10 e (d) Elemento finito TS2.



Fonte: Rigobello (2011)

Além disso, segundo uma definição do programa de cálculo, deve-se inserir os nós dos elementos no sentido anti-horário para o seu correto funcionamento com relação à interpretação dos dados de entrada.

Após a definição da geometria, o usuário deve inserir as propriedades dos materiais que compõem a seção transversal. Como grande parte das propriedades utilizadas dependem da temperatura do aço para serem definidas, são introduzidos pares temperatura versus a variável determinada, como no caso da condutividade térmica, densidade, calor específico e o fator de redução da resistência. Assim, conforme a curva temperatura versus tempo do problema, têm-se a definição desses parâmetros para cada intervalo de tempo. Além disso é introduzida a resistência e o módulo de elasticidade longitudinal dos materiais especificados.

Na sequência da entrada de dados, são definidos os segmentos de contorno da seção que estarão expostos ao fogo, juntamente com a curva temperatura versus tempo, o coeficiente de convecção e a emissividade.

Os contornos são definidos através da delimitação dos nós da seção transversal que compõe cada segmento de contorno. Cada segmento reflete em uma determinada exposição ao fogo, que é associada a uma curva temperatura versus tempo, um coeficiente de convecção e um coeficiente de emissividade. Quando se tem uma viga de piso por exemplo, todo o perímetro que não está em contato com a laje possui um contorno que está sujeito ao incêndio no compartimento, e a face superior do perfil possui outro segmento sem a incidência direta de calor.

A curva temperatura versus tempo a ser definida na entrada de dados depende do modelo de incêndio adotado pelo usuário. Na maioria das vezes é utilizado o modelo de incêndio padrão, em que a temperatura é calculada de acordo com Equação (1) descrita na ISO 834-1 (1999).

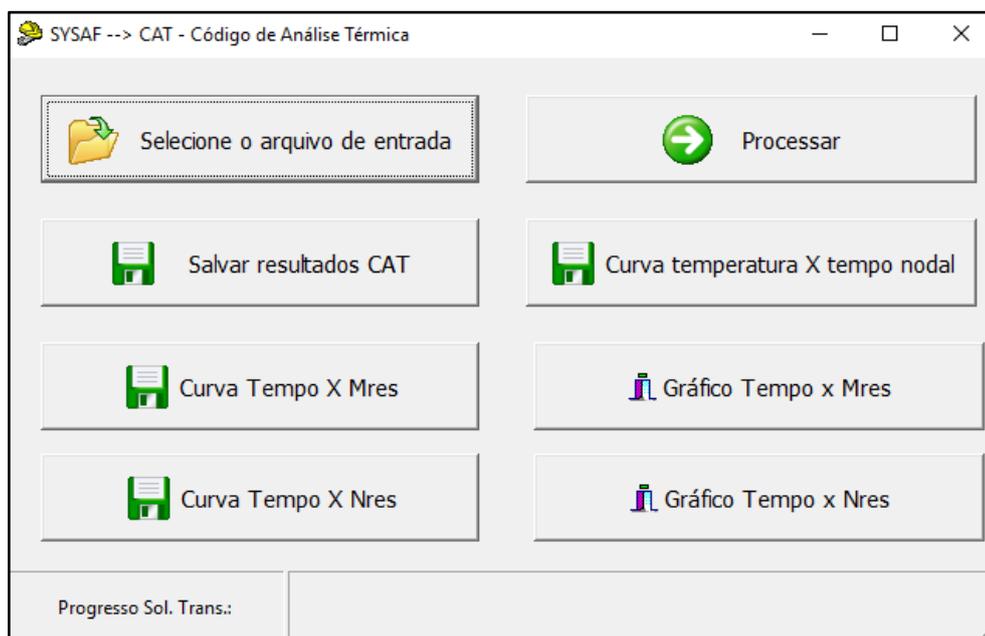
Como a entrada de dados do CAT é feita por meio de pares temperatura versus tempo, nos casos em que se tem formulações prontas, calcula-se a temperatura para vários pontos dentro do intervalo de tempo estabelecido no problema.

O coeficiente de convecção, segundo a NBR 14.323 (2013) pode ser tomado para efeitos práticos no valor de 25 W/m^2 para o modelo de incêndio padrão e 35 W/m^2 para o modelo de incêndio natural. Já o coeficiente de emissividade é definido para superfícies de concreto e aço no valor de 0,70 de acordo com a norma europeia EN 1994-1-2 (2005).

Para consideração da flambagem em seções transversais de pilares metálicos, são inseridos os comprimentos de flambagem em torno dos eixos x, y e z bem como o momento de inércia em torno dos três eixos cartesianos e a constante de empenamento da seção.

3.2.2. Interface do programa

A interface do programa é composta por 6 (seis) botões e uma barra de progresso, conforme mostra a Figura 20, que exigem uma apresentação ao usuário para a sua correta utilização.

Figura 20 – Interface do programa

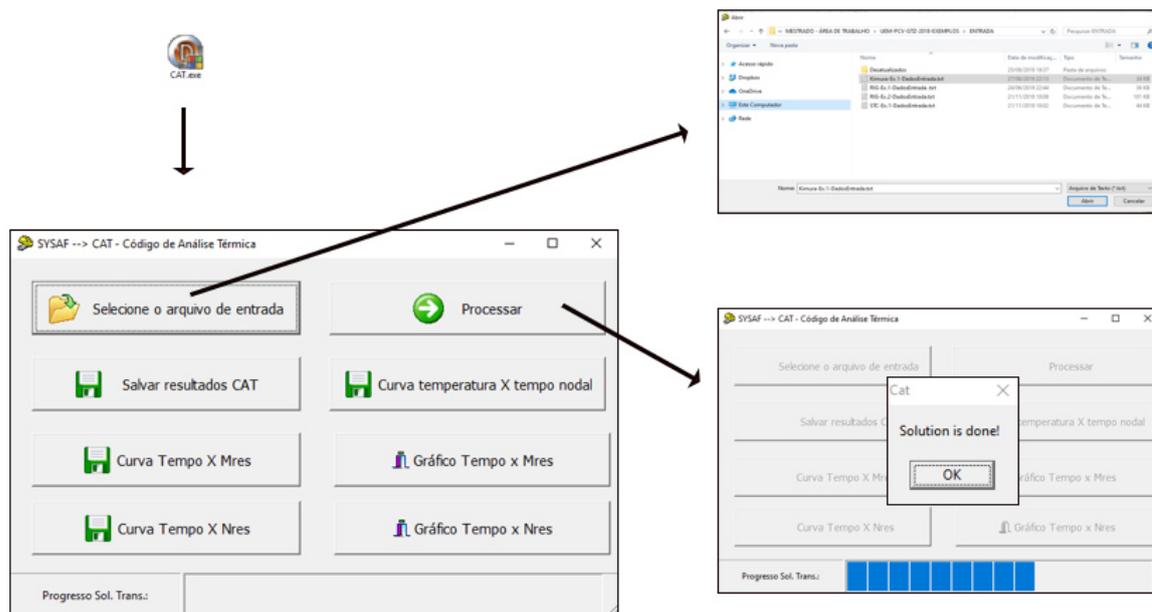
Fonte: o próprio autor

A utilização do programa se dá através da seleção do arquivo de entrada do problema, disposto em um bloco de notas conforme um padrão pré-estabelecido. A partir desse arquivo, o programa faz a leitura dos dados, para assim seguir a fase de processamento. De uma maneira geral, o ideal para elaborar uma nova análise é alterar o arquivo de entrada de dados de um exemplo já validado para evitar erros na sua formatação.

Após a leitura dos dados, faz-se o processamento do programa, que irá definir o campo de temperaturas ao longo do intervalo de tempo definido para todos os elementos finitos da seção transversal. O desenvolvimento desse processamento pode ser acompanhado pela barra de progresso disposta na parte inferior da interface do programa.

A Figura 21 demonstra a sequência de passos para a realização do processamento da análise térmica.

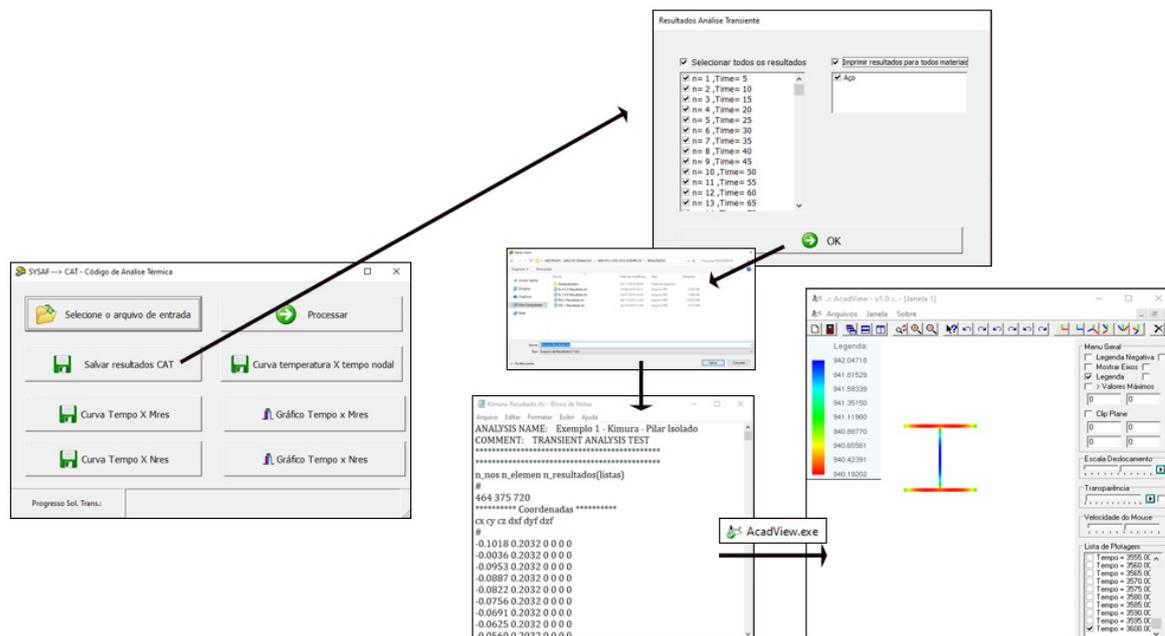
Figura 21 – Processamento da análise térmica



Fonte: o próprio autor

O botão “Salvar resultados CAT” salva os resultados pertinentes a análise térmica da seção transversal, podendo obter todos os resultados ou apenas para tempos e materiais específicos conforme uma caixa de seleção, enquanto o botão “Curva temperatura X tempo nodal” traça uma curva temperatura versus tempo para um nó específico determinado pelo usuário. Esse procedimento pode ser observado na Figura 22.

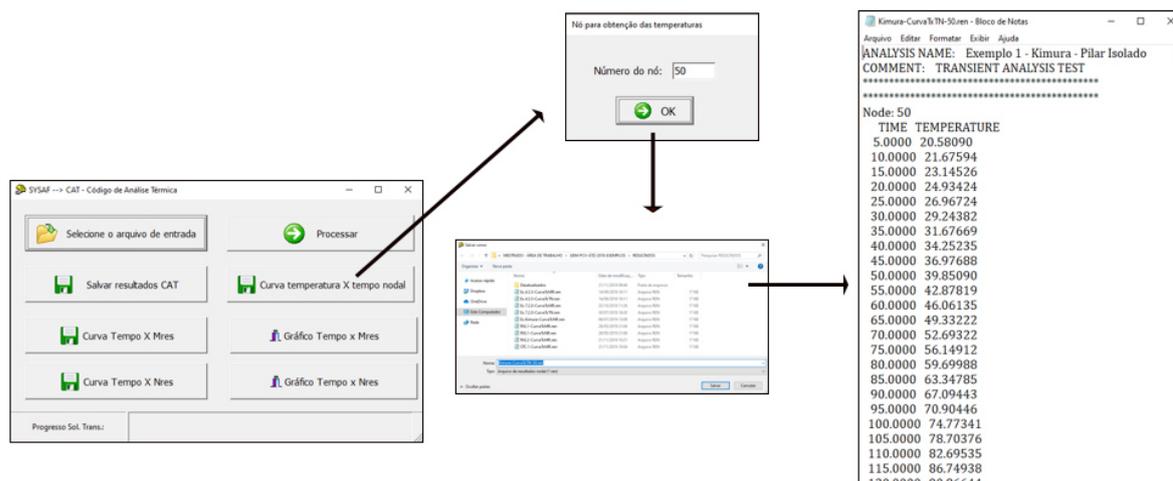
Figura 22 – Armazenamento e interpretação dos resultados da análise térmica



Fonte: o próprio autor

A Curva temperatura versus tempo nodal pode ser obtida através do procedimento demonstrado na Figura 23. Os resultados são salvos em um bloco de notas com os pontos da curva para um determinado nó da malha de elementos finitos.

Figura 23 – Obtenção da curva temperatura versus tempo nodal



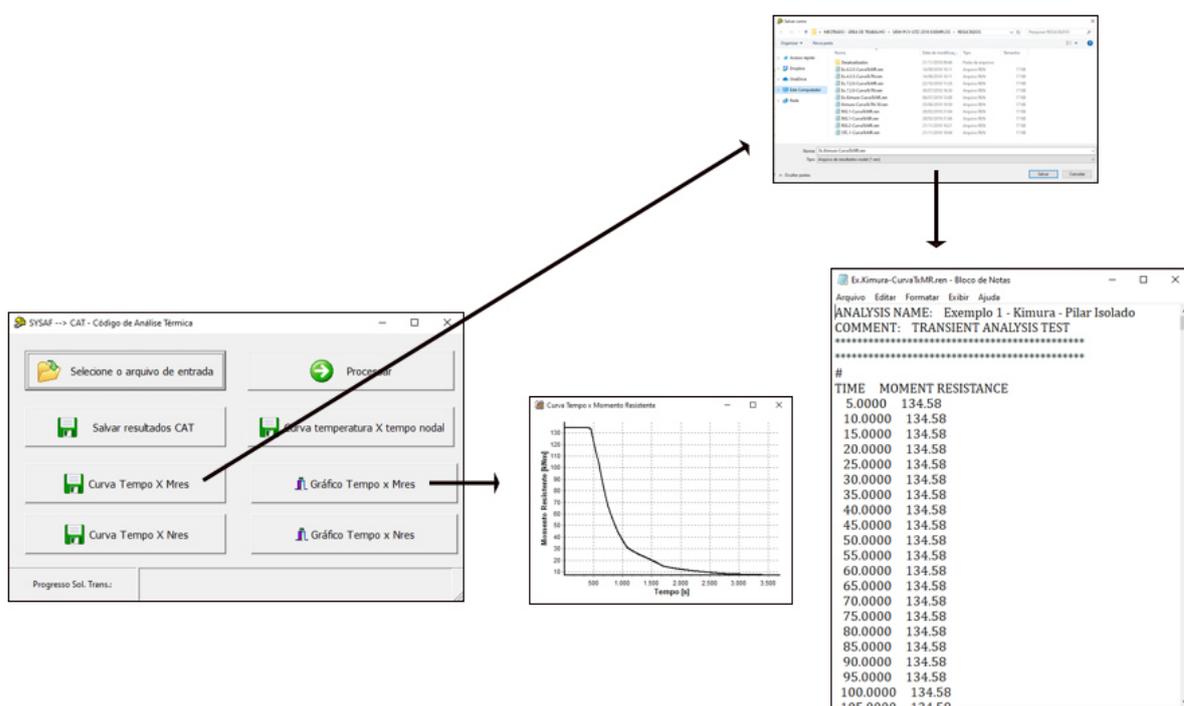
Fonte: o próprio autor

Esses 4 (quatro) primeiros comandos apresentados anteriormente já pertenciam a primeira versão do CAT, que tinha como função apenas a determinação do campo de temperaturas no perfil considerando o gradiente térmico.

Os quatro últimos botões foram inseridos neste trabalho, com intuito de estabelecer o momento e a normal resistente das seções transversais em situação de incêndio. A curva tempo versus resistência pode ser obtida pelo programa através dos seus pares ordenados em um bloco de notas, como também pode ser visualizada em um gráfico na própria interface do programa, vai depender da conveniência.

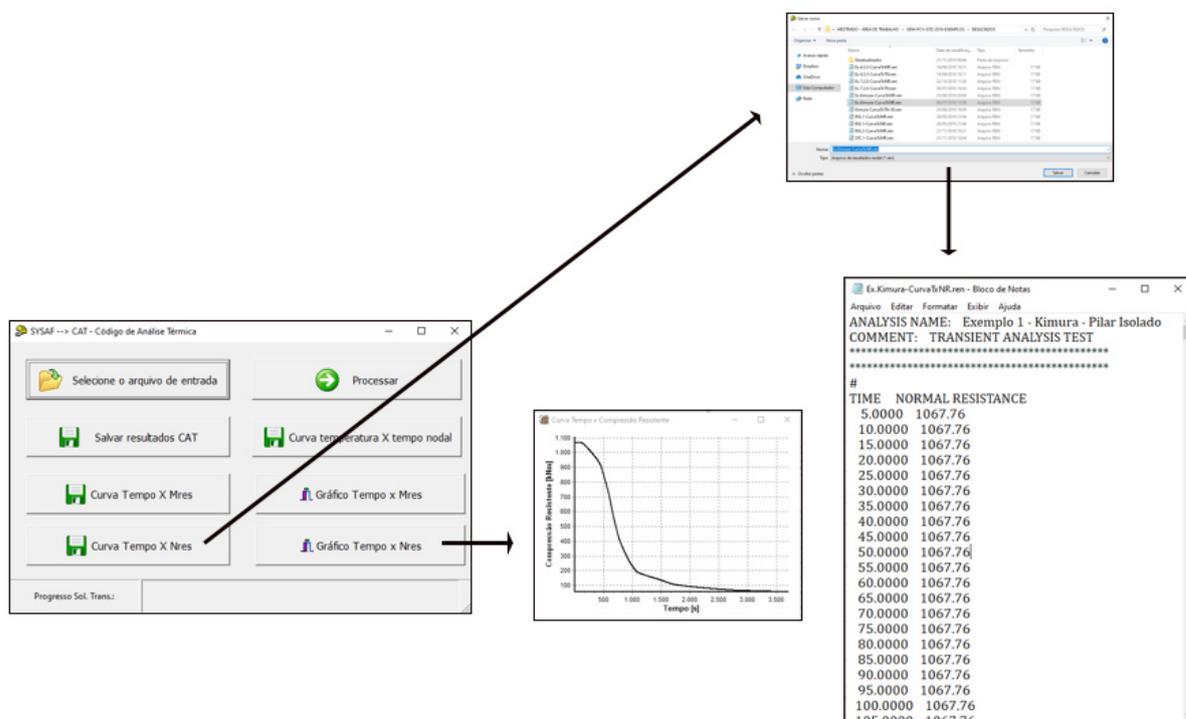
A Figura 24 demonstra o procedimento para obtenção da resistência à flexão de um perfil em situação de incêndio feita no CAT, já a Figura 25 apresenta um exemplo de resistência à compressão versus tempo de um pilar em situação de incêndio.

Figura 24 – Procedimento para obtenção da resistência à flexão de um perfil em situação de incêndio



Fonte: o próprio autor

Figura 25 – Procedimento para obtenção da resistência à compressão de um perfil em situação de incêndio

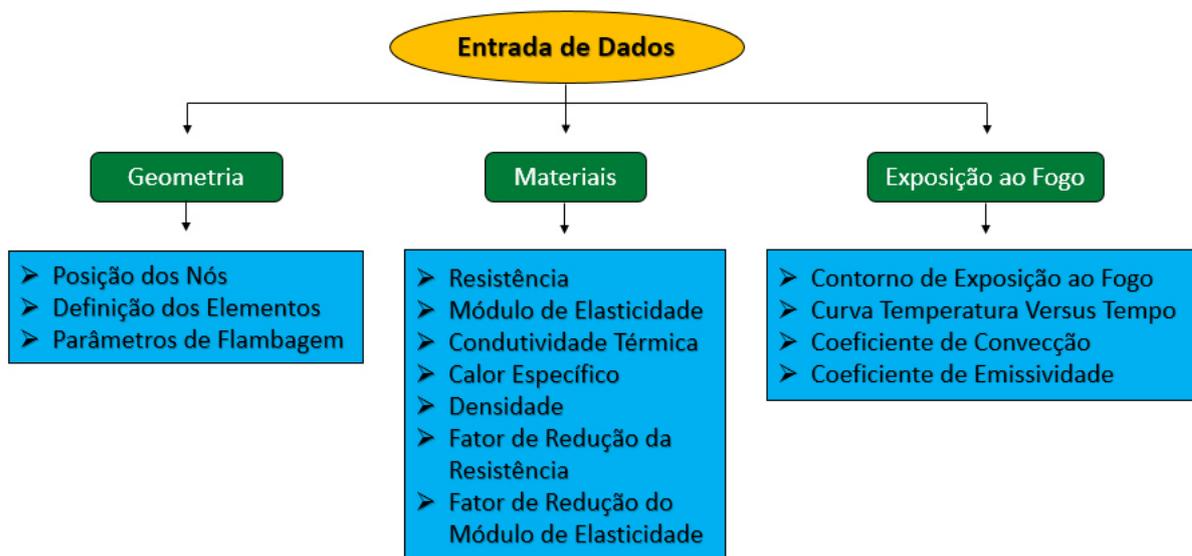


Fonte: o próprio autor

3.2.3. Fluxograma da rotina de cálculo

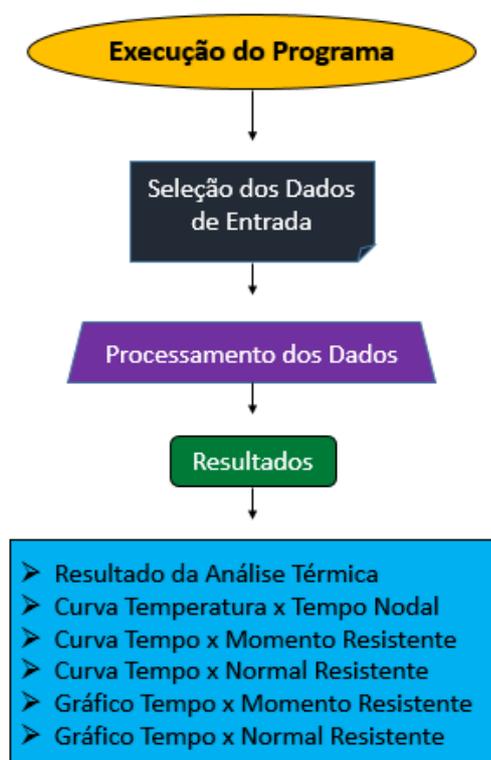
O fluxograma de utilização da rotina de cálculo está representado na Figura 26 e na Figura 27, que correspondem à entrada de dados e execução do programa respectivamente.

Figura 26 – Fluxograma da Entrada de Dados do Programa



Fonte: o próprio autor

Figura 27 – Fluxograma da Execução do Programa



Fonte: o próprio autor

CAPÍTULO 4 - VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

As respostas obtidas pelo programa desenvolvido neste trabalho foram comparadas a alguns exemplos de dimensionamento a fim de validar os resultados obtidos com outros programas já existentes no mercado.

Apesar das diversas informações relevantes que o programa oferece, o foco se dá na curva de resistência da seção transversal pelo tempo de duração do incêndio, que serão objeto de comparação neste item.

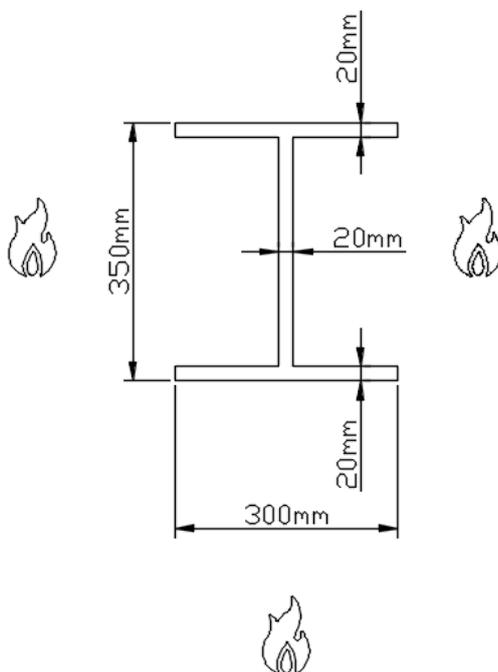
Os exemplos 1, 2 e 3 comparam a resistência à flexão das seções transversais, que trata de situações de vigas metálicas, já o exemplo 4 faz o comparativo da resistência ao esforço normal de compressão em um pilar isolado.

Para efeito de comparação e validação do programa, foi utilizado um exemplo do TCD 5.0 User's manual (2007) e dois exemplos extraídos da dissertação de Rigobello (2007). Na sequência, estes exemplos serão apresentados e especificados com maiores detalhes.

4.1. EXEMPLO 1

O Exemplo 1 foi extraído da referência Fire Safety Design (2007), e trata de um perfil I exposto ao fogo em 3 (três) lados, com 350 (trezentos e cinquenta) milímetros de altura, 300 (trezentos) milímetros de largura e espessuras de mesa e alma iguais a 20 (vinte) milímetros, conforme a Figura 28.

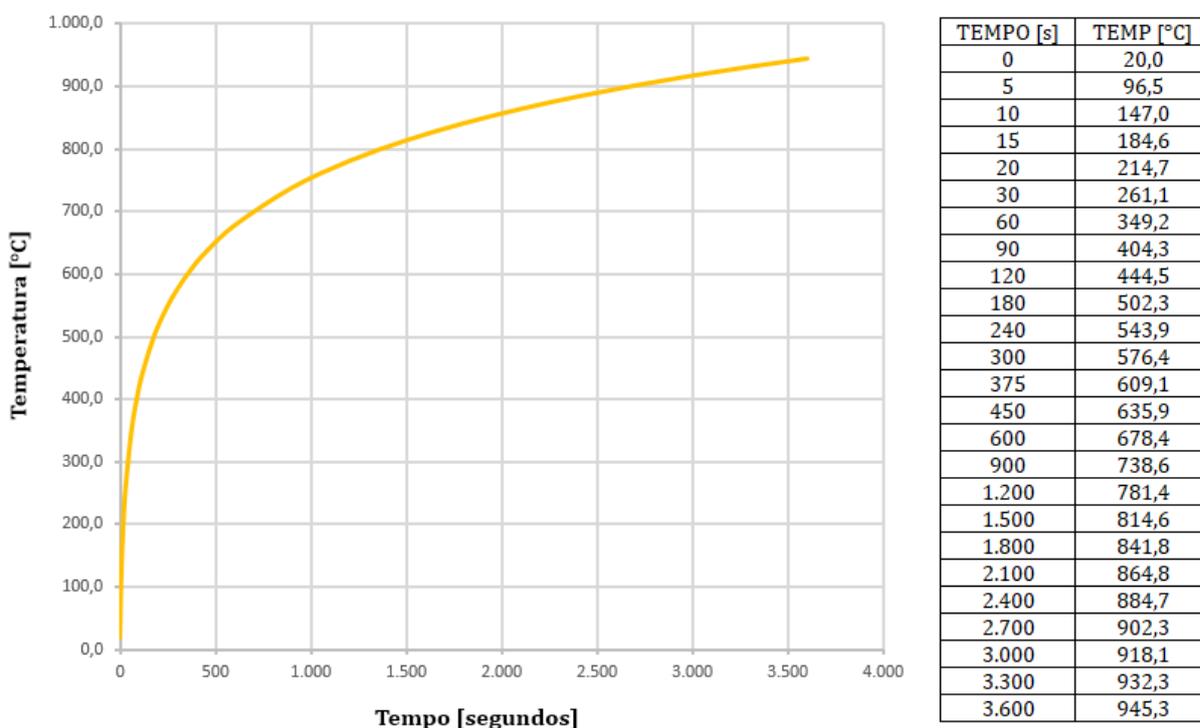
Figura 28 – Exemplo 1 – Perfil I exposto ao fogo em três lados



Fonte: o próprio autor

Neste exemplo foi considerado o modelo de incêndio padrão, conforme a ISO 834-1 (1999). A Figura 29 mostra a curva temperatura-tempo utilizada e os pontos inseridos na entrada de dados do programa.

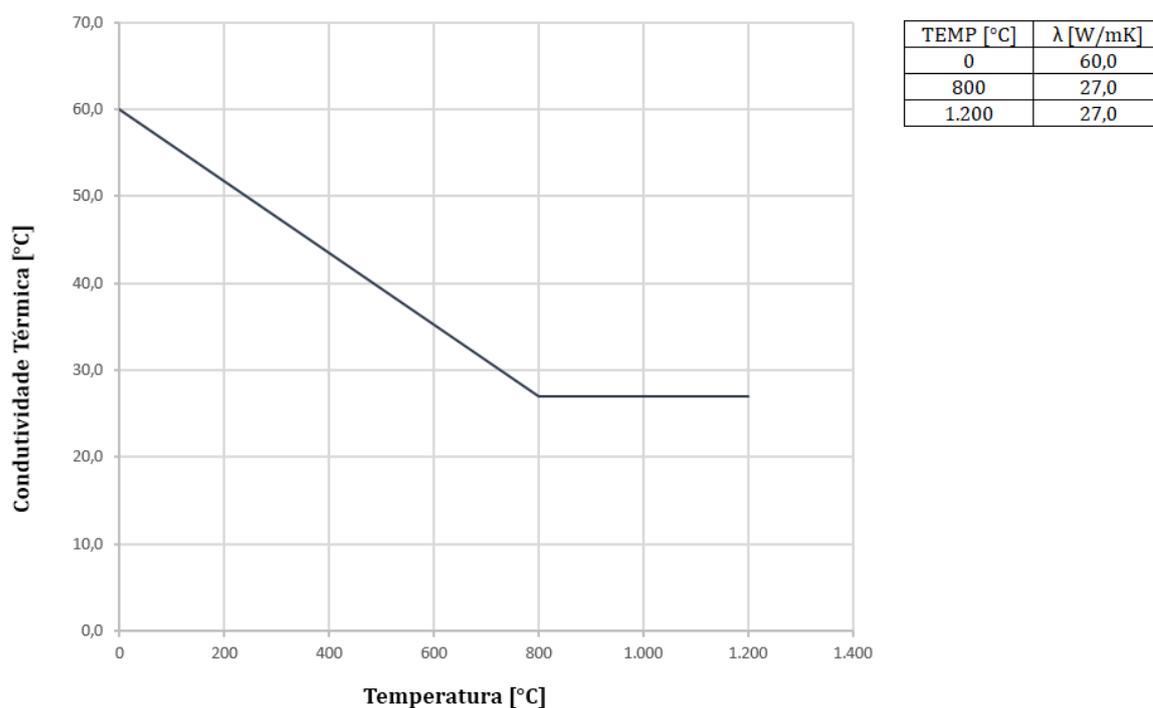
Figura 29 – Curva temperatura versus tempo do Exemplo 1



Fonte: o próprio autor

A condutividade térmica do perfil analisado foi definida conforme demonstrado na Figura 30.

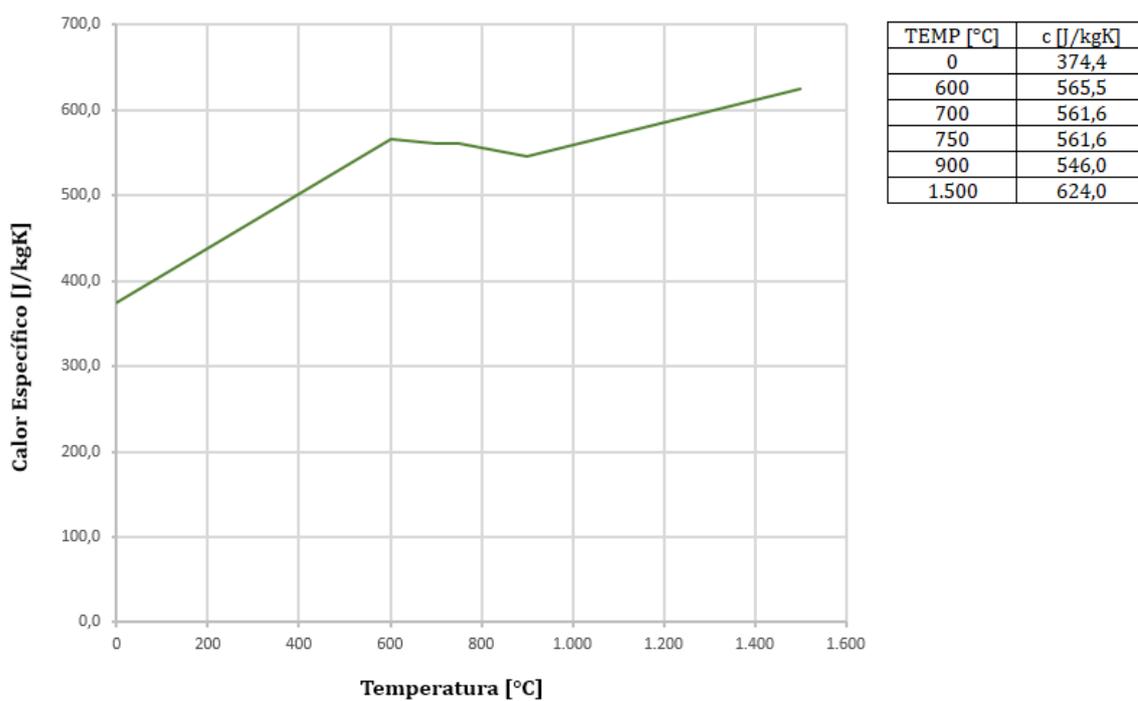
Figura 30 – Curva temperatura versus condutividade térmica do aço do Exemplo 1



Fonte: o próprio autor

O calor específico do aço do perfil foi definido conforme demonstrado na Figura 31.

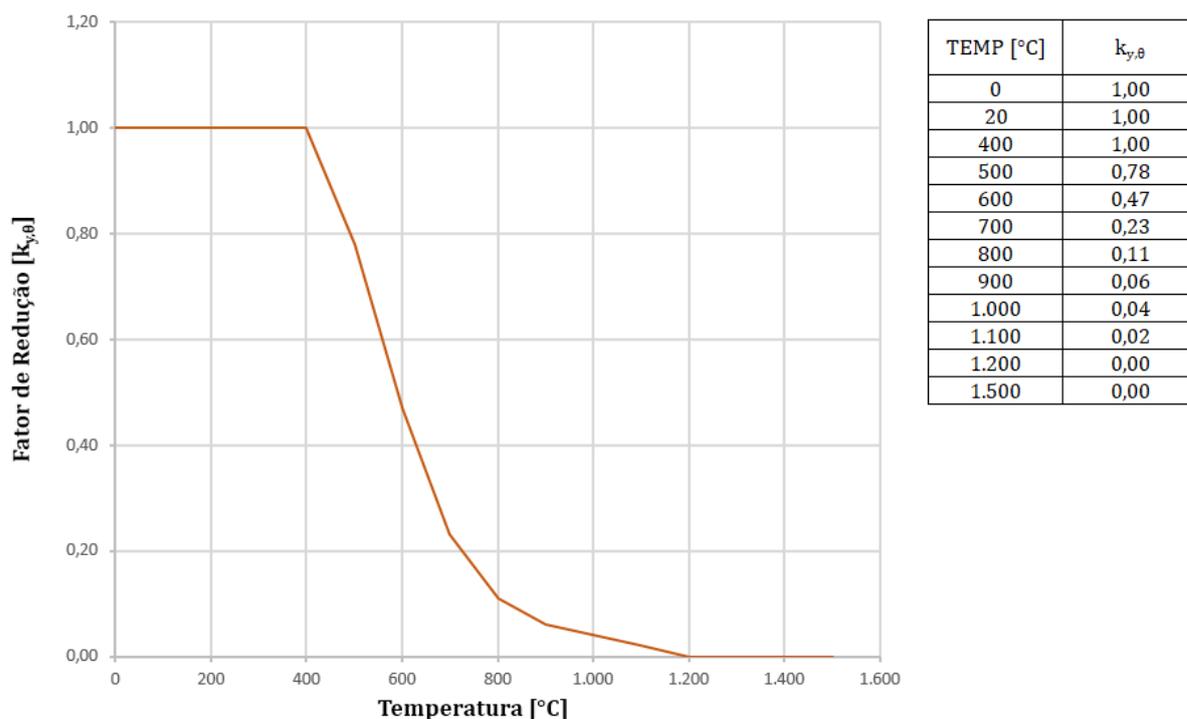
Figura 31 – Curva temperatura versus calor específico do aço do Exemplo 1



Fonte: o próprio autor

A densidade do aço foi adotada como constante no valor de 7.850 kg/m^3 , e o fator de redução da resistência ao escoamento do aço que neste caso é de 275 MPa , foi definido de acordo com o que se expõe na Figura 32.

Figura 32 – Curva temperatura versus fator de redução da resistência ao escoamento do aço do Exemplo 1



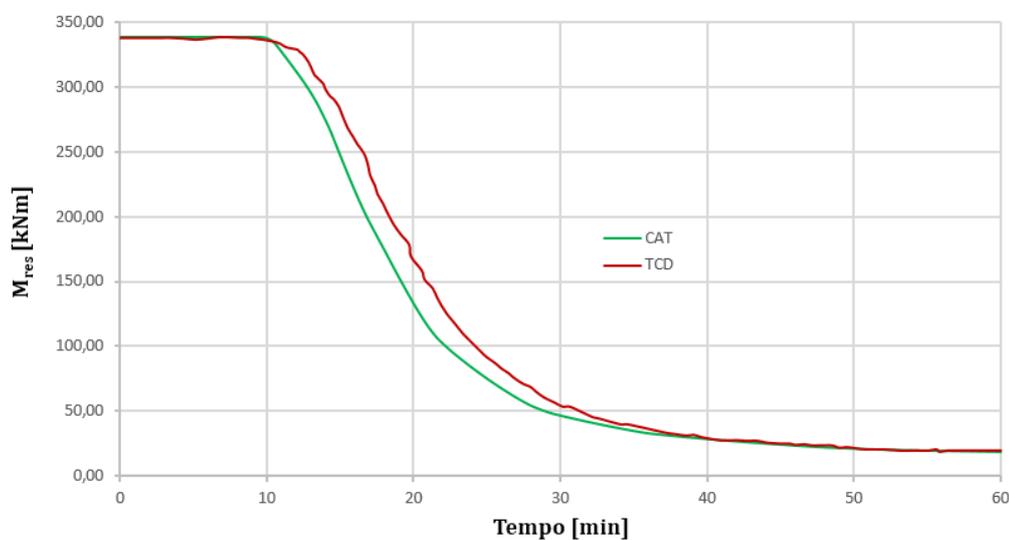
Fonte: o próprio autor

Por fim foi inserido um coeficiente de convecção de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ e coeficiente de emissividade de $0,5$, bem como definiu-se o contorno da seção sujeito ao fogo como todo o perímetro do perfil com exceção da face superior.

Após a inserção dos dados de entrada, obteve-se a curva de tempo versus momento resistente conforme a Figura 33. No mesmo gráfico foi sobreposta a curva obtida no manual elaborado em FSD (2007) através do programa TCD (*Temperature Calculation and Design*).

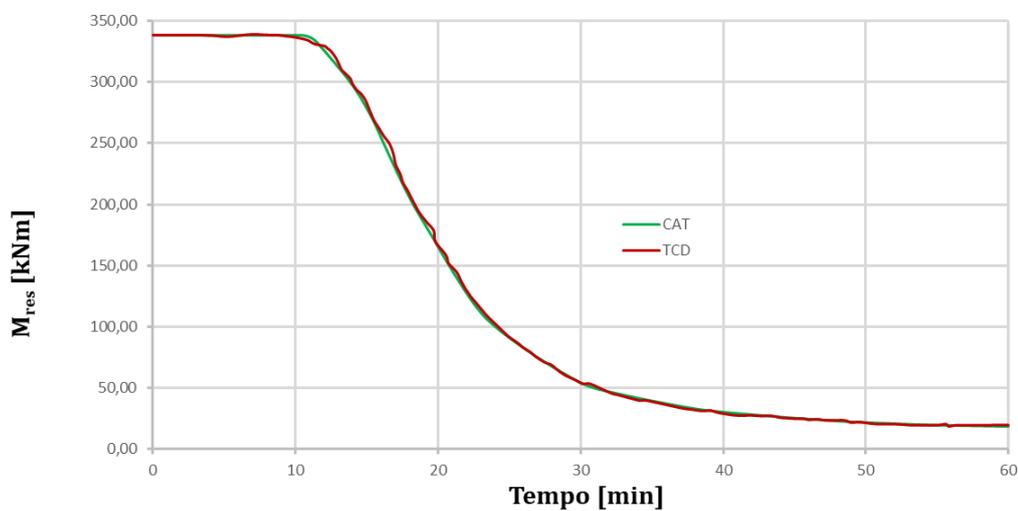
Na Figura 27 são sobrepostos os resultados considerando o coeficiente de emissividade de $0,4$, que foi o mesmo utilizado no TCD, e nesta comparação os resultados são praticamente os mesmos para os dois programas. Atualmente recomenda-se a utilização desse coeficiente no valor de $0,5$.

Figura 33 – Curva momento resistente versus tempo do Exemplo 1 – coeficiente de emissividade = 0,5



Fonte: o próprio autor

Figura 34 – Curva momento resistente versus tempo do Exemplo 1 – coeficiente de emissividade = 0,4



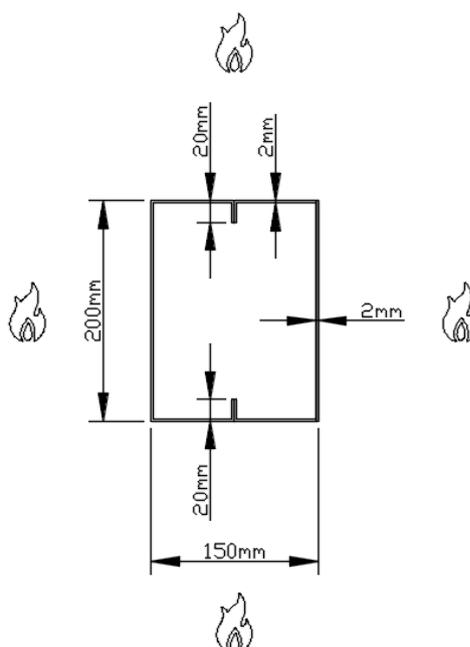
Fonte: o próprio autor

Como pode ser observado nos gráficos de momento resistente por tempo, com a alteração da emissividade para o valor de 0,4 as curvas ficaram bastante próximas. O que dá a entender que foi utilizado este valor na análise realizada pelo TCD, apesar desta informação não constar no manual.

4.2. EXEMPLO 2

O Exemplo 2 foi retirado do trabalho de Rigobello (2007), e trata de um perfil 2Ue (duplo U enrijecido) exposto pelo fogo pelos 4 (quatro) lados, com 200 (duzentos) milímetros de altura, 150 (cento e cinquenta) milímetros de largura e espessuras de mesa e alma iguais a 2 (dois) milímetros, conforme a Figura 35.

Figura 35 – Exemplo 2 – Perfil duplo U enrijecido exposto ao fogo em quatro lados

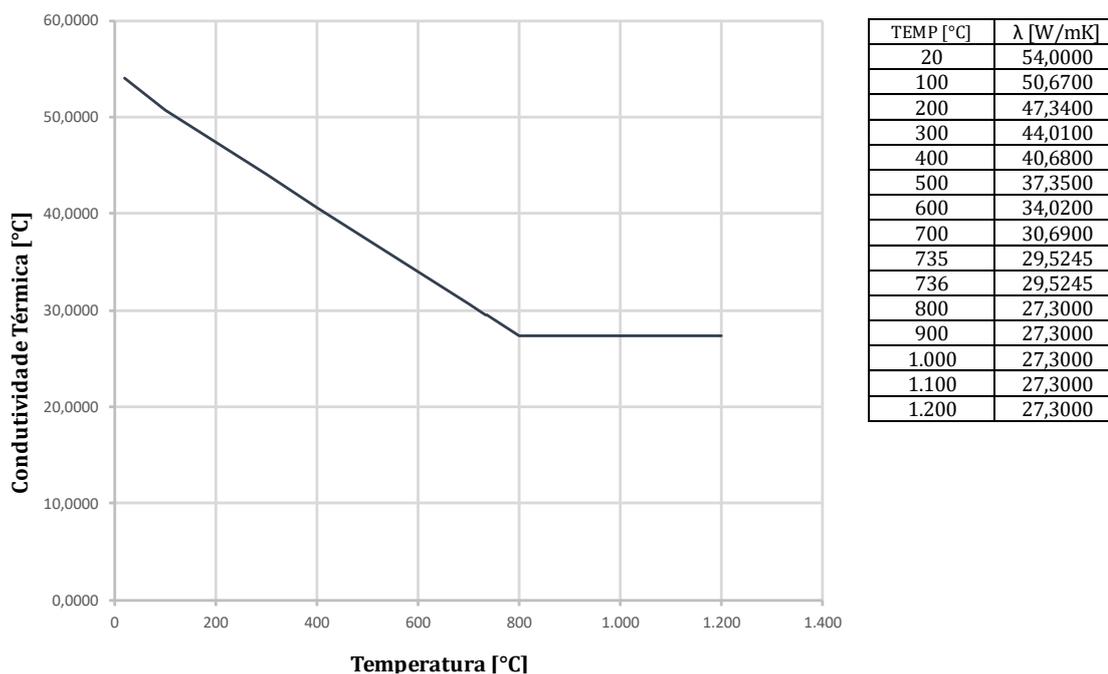


Fonte: o próprio autor

Neste exemplo também foi considerado o modelo de incêndio padrão da ISO 834-1 (1999), conforme apresentado anteriormente na Figura 29.

A condutividade térmica do perfil analisado foi definida conforme demonstrado na a Figura 36.

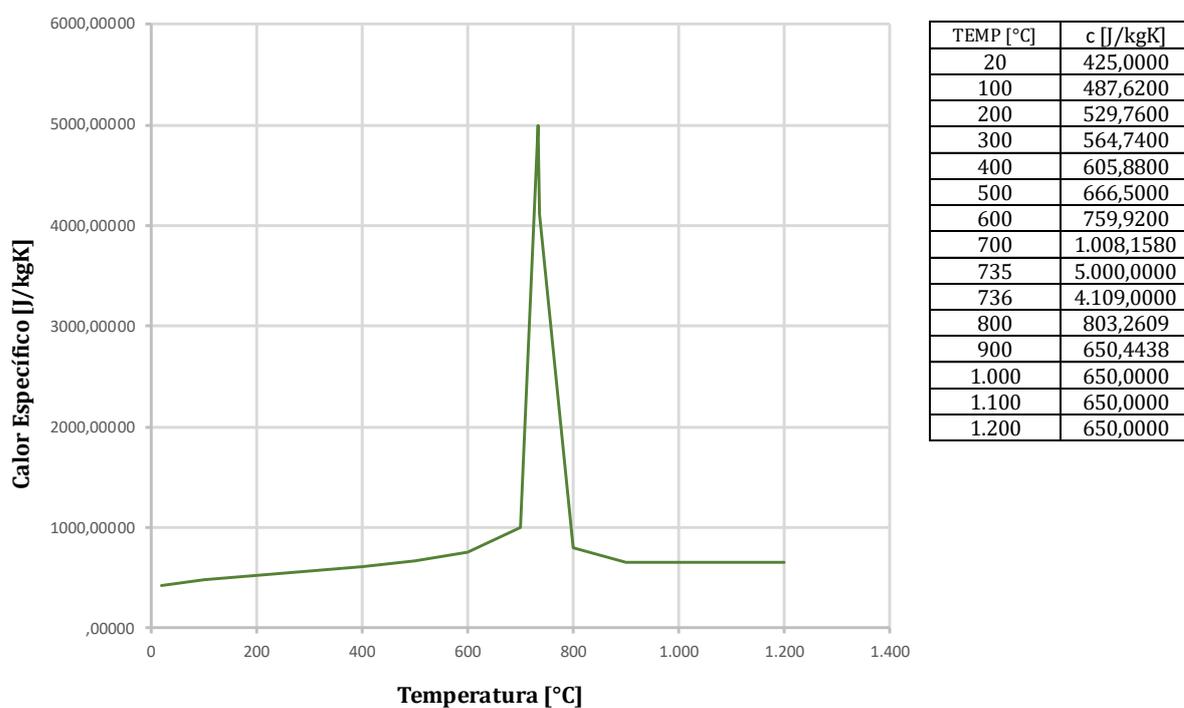
Figura 36 – Curva temperatura versus condutividade térmica do aço do Exemplo 2



Fonte: o próprio autor

O calor específico do aço do perfil foi definido conforme demonstrado na Figura 37.

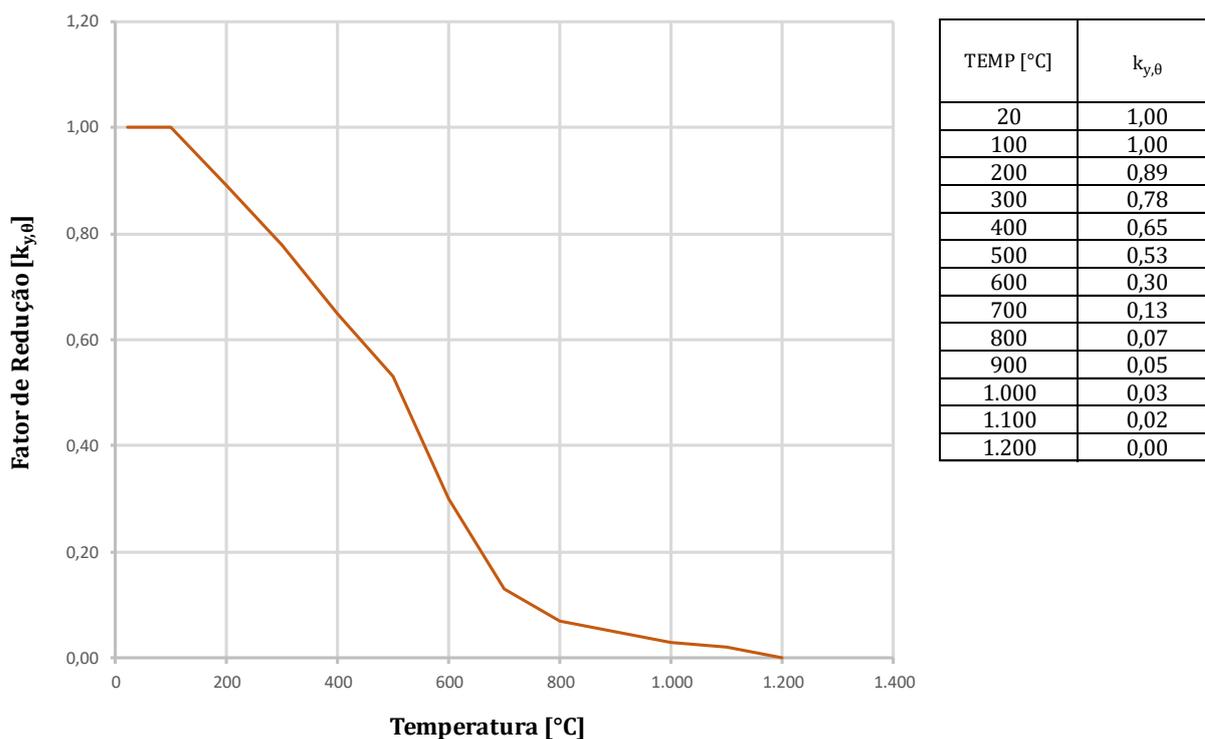
Figura 37 – Curva temperatura versus calor específico do aço do Exemplo 2



Fonte: o próprio autor

A densidade do aço foi adotada como constante no valor de 7.850 kg/m^3 , e o fator de redução da resistência ao escoamento do aço que neste caso é de 300 MPa , foi definido de acordo com o que se expõe na Figura 38.

Figura 38 – Curva temperatura versus fator de redução da resistência ao escoamento do aço do Exemplo 2

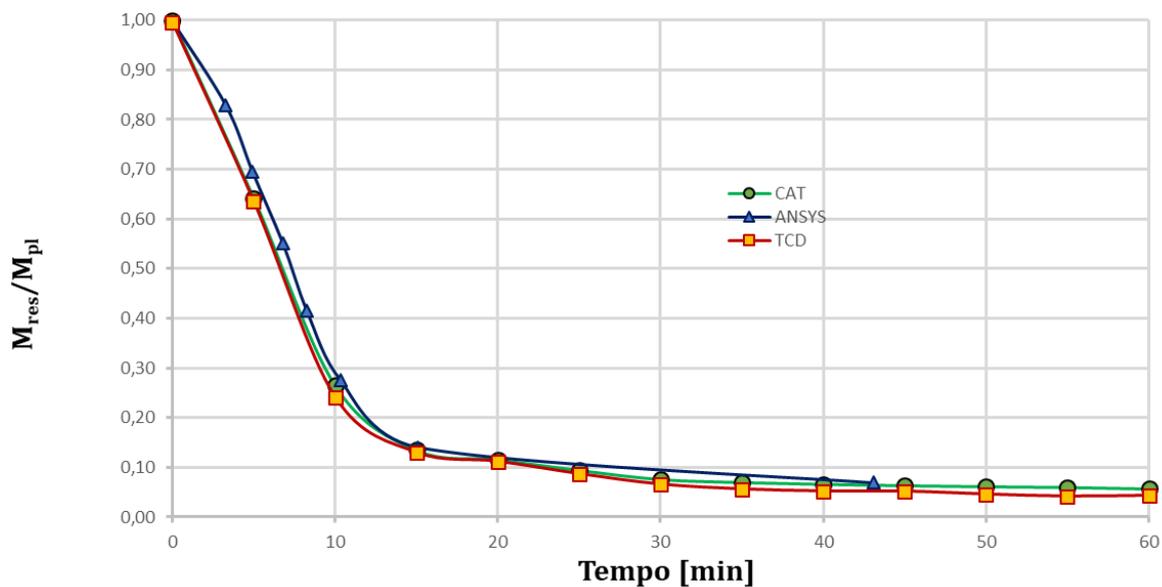


Fonte: o próprio autor

Por fim foi inserido um coeficiente de convecção de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ e coeficiente de emissividade de $0,5$, bem como definiu-se o contorno da seção sujeito ao fogo como todo o perímetro externo do perfil.

Após a inserção dos dados de entrada, obteve-se a curva de tempo versus momento resistente conforme a Figura 39. No mesmo gráfico foi sobreposta a curva através do programa TCD e do ANSYS, de acordo com o trabalho realizado por Rigobello (2007).

Figura 39 – Curva momento resistente versus tempo do Exemplo 2



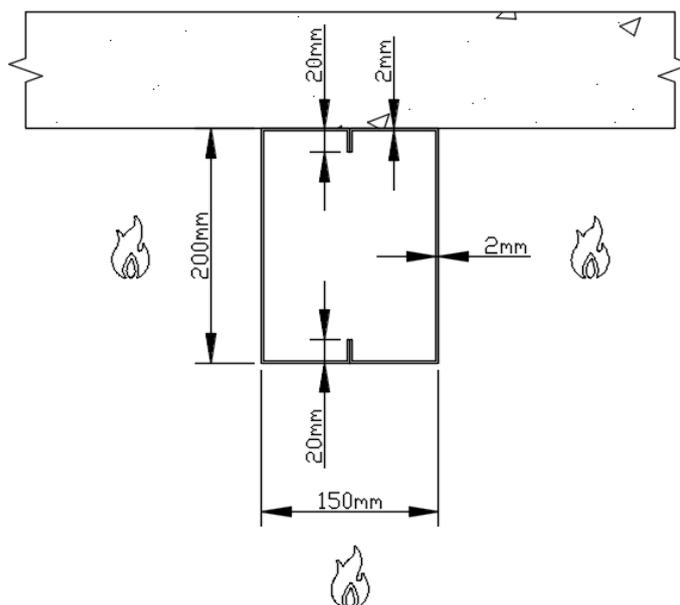
Fonte: o próprio autor

4.3. EXEMPLO 3

O Exemplo 3 foi retirado do trabalho de Rigobello (2007), e trata de um perfil 2Ue (duplo U enrijecido) misto com laje de concreto, exposto pelo fogo por 3 (três) lados, com 200 (duzentos) milímetros de altura, 150 (cento e cinquenta) milímetros de largura e espessuras de mesa e alma iguais a 2 (dois) milímetros, conforme a Figura 40.

Neste exemplo a laje de concreto não foi considerada como elemento resistente da seção transversal, apenas foi utilizada para considerar o seu efeito no campo de temperaturas do perfil, o que ocorre em vigas de piso.

Figura 40 – Exemplo 3 – Perfil duplo U enrijecido misto com laje de concreto exposto ao fogo em quatro lados

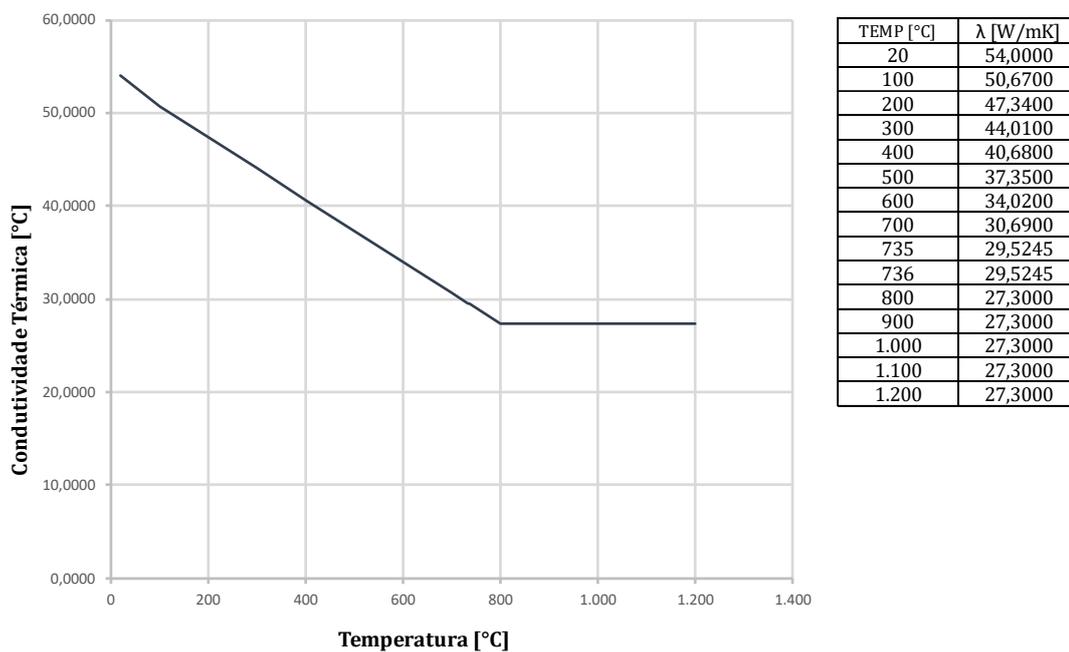


Fonte: o próprio autor

Assim como nos dois exemplos anteriores, este exemplo também considera o modelo de incêndio padrão da ISO 834-1 (1999), apresentado anteriormente na Figura 29.

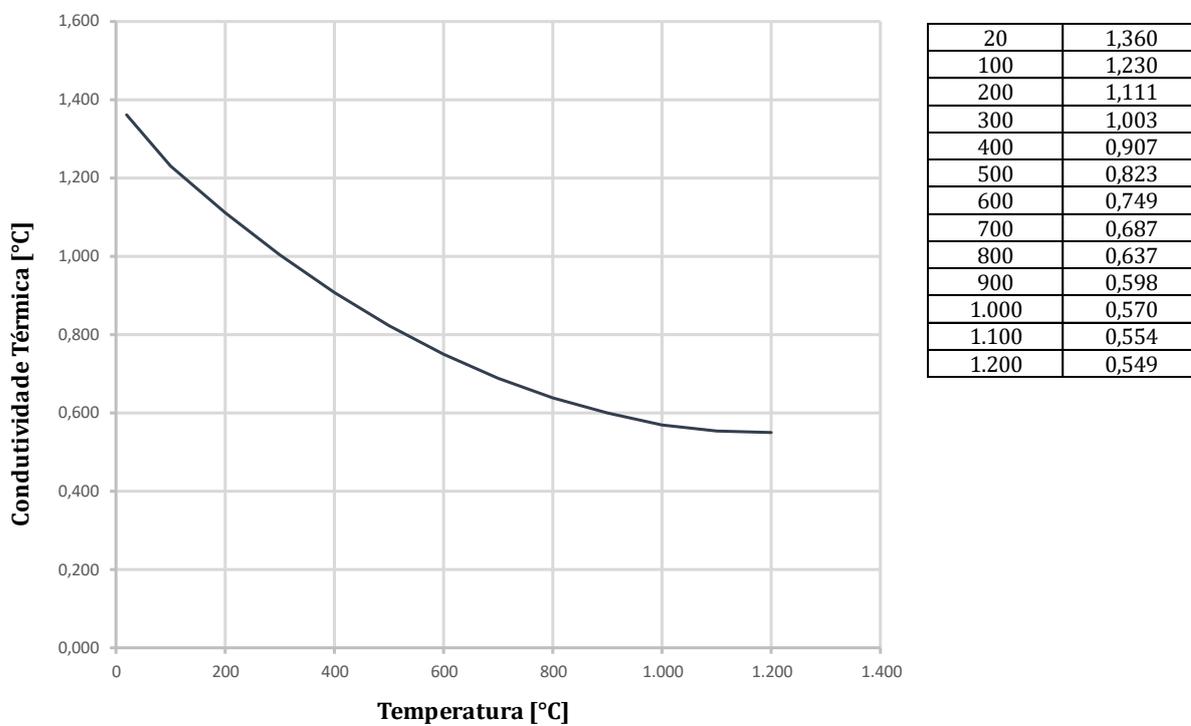
A condutividade térmica do aço e do concreto do perfil foram definidas conforme a Figura 41 e a Figura 42 respectivamente.

Figura 41 – Curva temperatura versus condutividade térmica do aço do Exemplo 3



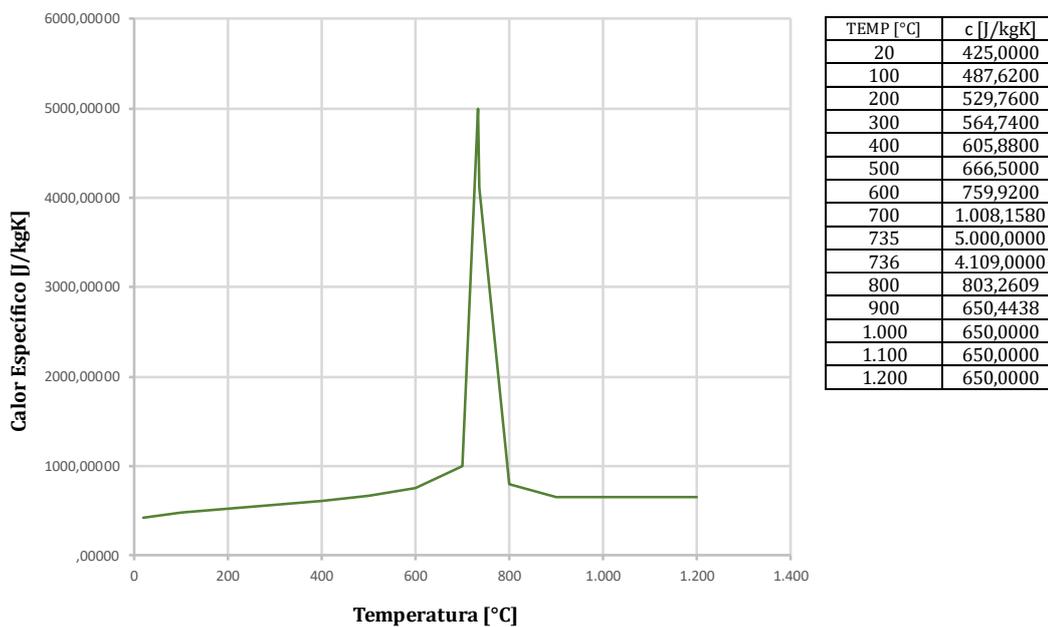
Fonte: o próprio autor

Figura 42 – Curva temperatura versus condutividade térmica do concreto do Exemplo 3

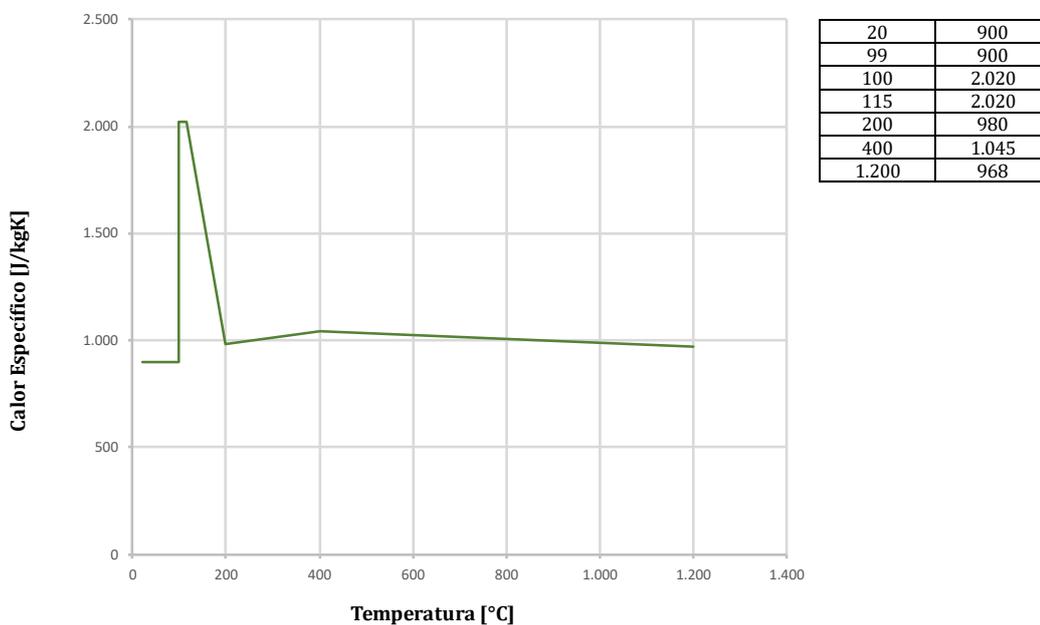


Fonte: o próprio autor

O calor específico do aço e do concreto do perfil foram definidos conforme a Figura 43 e a Figura 44 respectivamente.

Figura 43 – Curva temperatura versus calor específico do aço do Exemplo 3

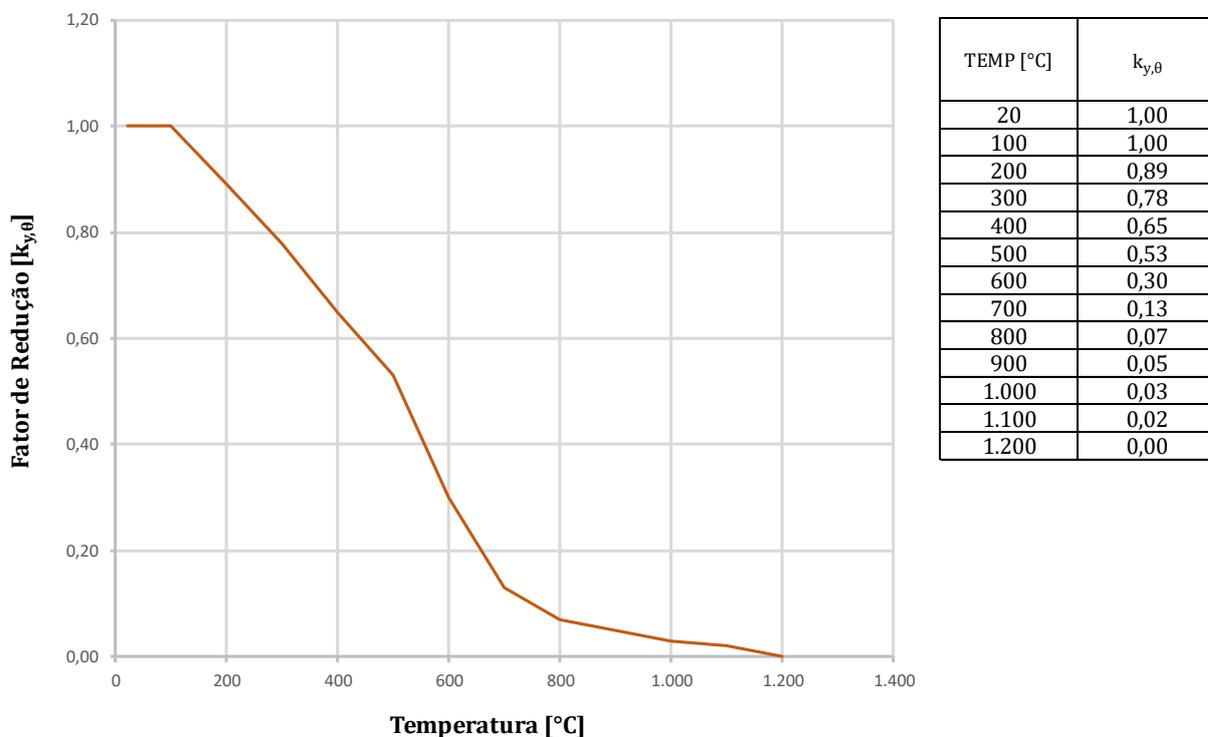
Fonte: o próprio autor

Figura 44 – Curva temperatura versus calor específico do concreto do Exemplo 3

Fonte: o próprio autor

A densidade do aço foi adotada como constante no valor de 7.850 kg/m^3 e a do concreto no valor de 2.400 kg/m^3 , e o fator de redução da resistência ao escoamento do aço que neste caso é de 300 MPa , foi definido de acordo com o que se expõe na Figura 45. A resistência do concreto foi desconsiderada neste exemplo.

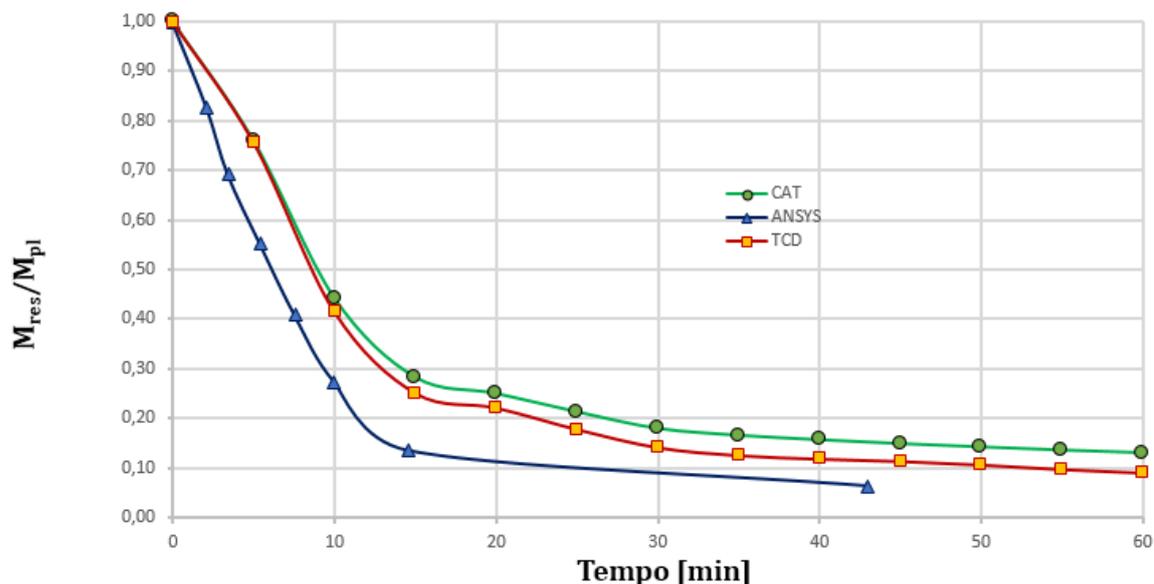
Figura 45 – Curva temperatura versus fator de redução da resistência ao escoamento do aço do Exemplo 3



Fonte: o próprio autor

Por fim foi inserido um coeficiente de convecção de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ e coeficiente de emissividade de 0,5, bem como definiu-se o contorno da seção sujeito ao fogo como todo o perímetro do perfil com exceção da face superior.

Após a inserção dos dados de entrada, obteve-se a curva de tempo versus momento resistente conforme a Figura 46. No mesmo gráfico foi sobreposta a curva através do programa TCD e do ANSYS, de acordo com o trabalho realizado por Rigobello (2007).

Figura 46 – Curva momento resistente relativo versus tempo do Exemplo 3

Fonte: o próprio autor

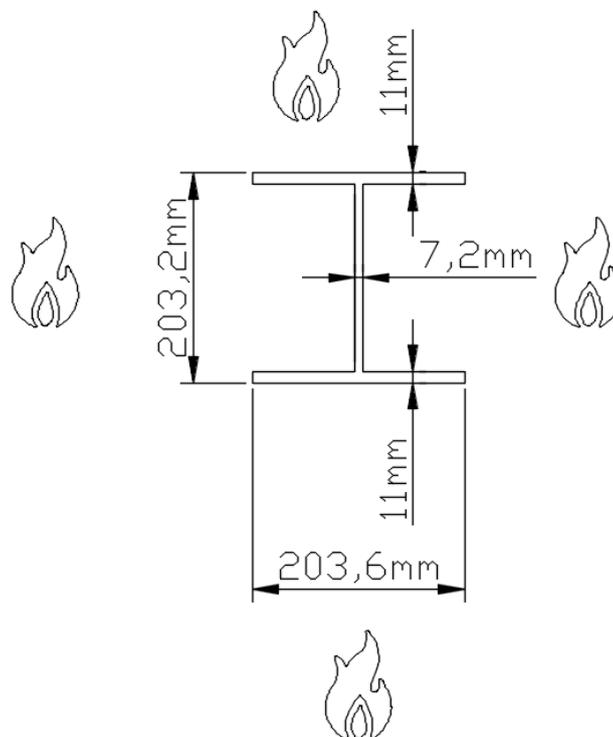
A diferença observada no gráfico entre os resultados obtidos pelo ANSYS com relação aos demais programas se deve ao fato do ANSYS fazer uma análise mais completa do elemento estrutural. Enquanto o CAT e o TCD analisam apenas a seção transversal do perfil, o ANSYS considera todo o elemento, que pode estar sujeito a instabilidades laterais, o que reduz significativamente sua resistência.

Neste caso o Ansys apresentou resultados mais conservadores do ponto de vista da segurança estrutural.

4.4. EXEMPLO 4

O Exemplo 4 foi retirado de um trabalho feito por Kimura (2009), e trata de um pilar isolado exposto ao fogo em 4 (três) lados, com 203,2 (duzentos e três virgula dois) milímetros de altura, 203,6 (duzentos e três virgula seis) milímetros de largura e espessuras de mesa iguais a 11 (onze) milímetros e espessura da alma igual a 7,2 (sete virgula dois) milímetros, conforme a Figura 47.

Figura 47 – Exemplo 4 – Pilar Isolado exposto ao fogo em quatro lados



Fonte: o próprio autor

Assim como nos dois exemplos anteriores, este exemplo também considera o modelo de incêndio padrão da ISO 834-1 (1999), apresentado anteriormente na Figura 29.

A condutividade térmica do aço foi calculada de acordo com a Equação (4), enquanto o calor específico do aço foi calculado de acordo com a Equação (5).

O módulo de elasticidade do aço considerado foi de 200 GPa, a resistência ao escoamento de 275 MPa e a densidade do aço foi adotada como constante no valor de 7.850 kg/m^3 ,

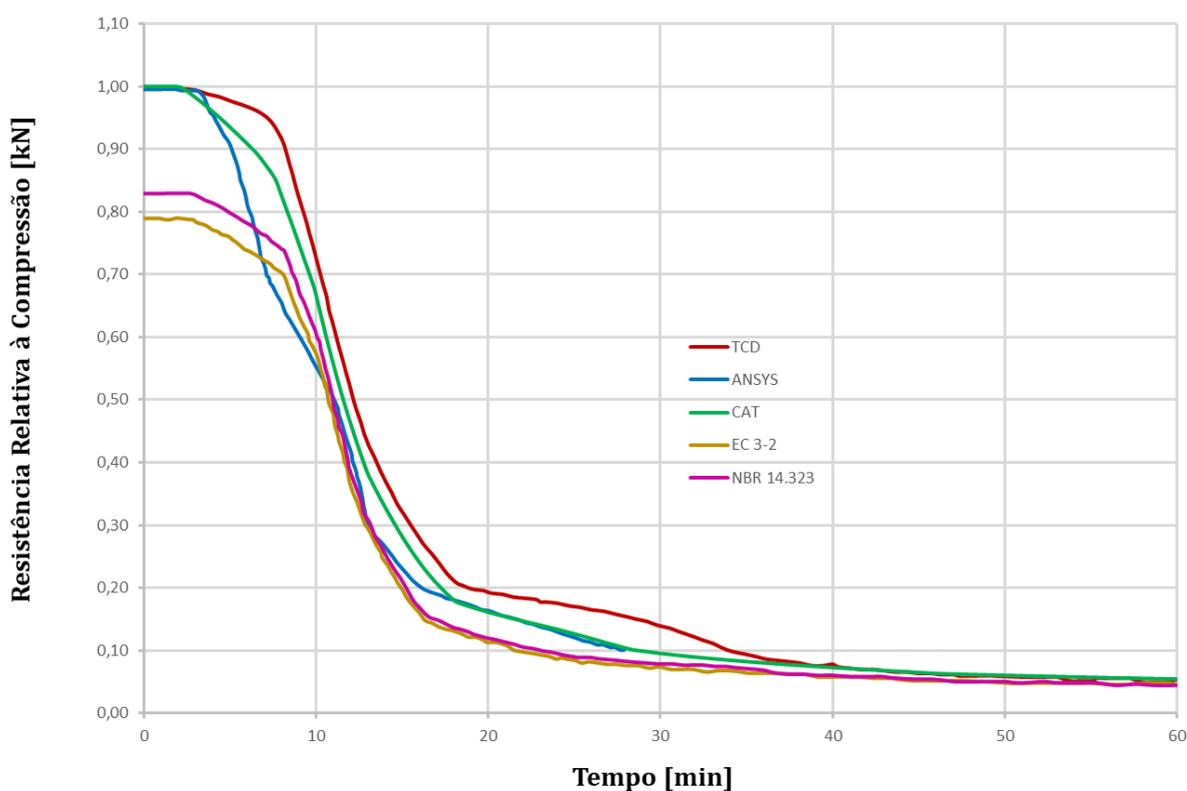
A o fator de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade do aço foram definidos de acordo com o que se expõe na Tabela 1.

Foi inserido um coeficiente de convecção de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ e coeficiente de emissividade de 0,5, bem como definiu-se o contorno da seção sujeito ao fogo como todo o perímetro do perfil.

Após a inserção dos dados de entrada, obteve-se a curva do tempo versus resistência relativa a compressão conforme a Figura 48. No mesmo gráfico foi sobreposto os resultados obtidos através do programa TCD e do ANSYS, bem como os cálculos realizados de acordo a NBR 14.323 e no CEN EN 1993-1-1: 2005 presentes no trabalho feito por Kimura (2009).

A resistência relativa à compressão corresponde a razão entre a resistência da seção em situação de incêndio e a resistência à temperatura ambiente.

Figura 48 – Curva resistência relativa à compressão versus tempo do Exemplo 4



Fonte: o próprio autor

Observando o resultado dos gráficos, percebe-se que as formulações simplificadas de cálculo apresentadas na NBR 14.323 e no CEN EN 1993-1-1: 2005 apresentam resultados mais conservadores quando comparados aos encontrados nos programas de cálculo e modelagem estrutural. Entretanto essa diferença tende a diminuir com o aumento da temperatura da seção transversal.

CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O código de cálculo para análise de seções transversais de vigas e pilares desenvolvido neste trabalho teve como propósito obter a resistência à flexão de vigas e pilares de aço em situação de incêndio considerando o campo de temperaturas da seção transversal. Para tanto, fez-se uso das normas brasileiras e europeias vigentes e de literaturas inerentes ao assunto.

Com as resistências obtidas pelo programa para perfis sujeitos a altas temperaturas, foi possível comparar com resultados presentes na literatura. Por meio desse comparativo observou-se que os resultados do programa são confiáveis e adequados, uma vez que ficaram muito próximos daqueles utilizados como referência.

Observando o Exemplo 3, que teoricamente é mais complexo que os demais, uma vez que é composto por dois materiais diferentes, aço e concreto, e comparado com dois programas diferentes, TCD e ANSYS, nota-se pelo gráfico do momento resistente relativo versus tempo que os resultados obtidos no presente trabalho se aproximam mais dos valores obtidos pelo TCD do que os obtidos pelo ANSYS. Isso se justifica pela diferença de abordagem dos programas utilizados, já que o TCD e o CAT (presente trabalho) consideram apenas a seção transversal para obtenção dos resultados, enquanto o ANSYS considera o elemento estrutural completo em uma análise não linear.

Por fim, conclui-se que o programa elaborado neste trabalho permitiu de forma eficiente obter a evolução da avaliação da resistência a flexão das seções transversais de aço em situação de incêndio, bem como à resistência à compressão de pilares de aço em situação de incêndio, para as situações consideradas.

CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com interesse em contribuir ainda mais o tema em questão, dentro do assunto deste trabalho, sugere-se acrescentar ao programa desenvolvido os seguintes pontos:

- Análise da resistência de vigas mistas de piso em situação de incêndio, considerando a contribuição de resistência do concreto;
- Análise da resistência à flexão composta de vigas e pilares metálicos em situação de incêndio;
- Análise de pilares mistos e de concreto em situação de incêndio.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, A.; CHOE, L.; VARMA, A. H. Fire design of steel columns: effects of thermal gradients. **Journal of Constructional Steel Research**, n. 93, p. 107-118, 2014.

ALBERTA, U. O. ANSYS Utilities - Introduction. **ANSYS Tutorial [Online]**. Disponível em: <<https://sites.ualberta.ca/~wmoussa/AnsysTutorial/>>. Acesso em: 1 fevereiro 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E119**: Standard test methods for fire tests of building construction and materials. Washington: [s.n.]. 2000.

ANSYS, INC. ANSYS®. **Academic Research Mechanical, Release 19.0**. [S.l.]: Help System, Mechanical APDL Documentation, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.432**: Exigências de resistência ao fogo. Rio de Janeiro: [s.n.], 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2013.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Estruturas de concreto armado em situação de incêndio. In: XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 2002, Brasília. **Anais do XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural**, Brasília: UnB, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-1-2**: Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-2: General actions - actions on structures exposed to fire. Brussels: [s.n.]. 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1993-1-1**: Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: [s.n.]. 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1993-1-2**: Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-2: General rules - structural fire design. Brussels: [s.n.]. 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1994-1-2**: Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures. Brussels: [s.n.]. 2005.

FIRE SAFETY DESIGN (FSD). **TCD 5.0 User's manual**. Lund: Fire Safety Design AB, 2007.

FRANSSEN, J. M.; KODUR, V.; ZAHARIA, R. **Designing steel structures for fire safety**. Londres: CRC Press. 2009.

IDERA, INC. **EMBARCADERO Delphi Academic Edition**. [S.l.]: [s.n.], 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834-1: Fire-resistance tests - elements of building construction - Part 1: General requirements**. Genebra: [s.n.], 1999.

KIMURA, E. **Análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

KIRCHHOF, L. D. **Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

MAKELAINEN, P.; MA, Z. Fire resistance of composite slim floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, n. 54, p. 345-363, 2000.

PANNONI, F. D. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 6. ed. [S.l.]: Gerdau, 2015.

PIERIN, I.; SILVA, V. P.; LA ROVERE, H. L. Análise térmica de estruturas bidimensionais em situação de incêndio. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Pauo: Ibracon, v. 8, 2015.

PURKISS, J. A. **Fire safety engineering: design of structures**. 2. ed. Birmingham: Elsevier, 2007.

RIGOBELLO, R. **Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

RIGOBELLO, R. **Desenvolvimento e aplicação de código computacional para análise de estruturas de aço aporticadas em situação de incêndio**. Tese (Doutorado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

SEITO, A. I. et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008.

SILVA, C. J. **Comportamento de estruturas metálicas e mistas em situação de incêndio. Modelagem e aplicações**. Dissertação (Mestrado). Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2002.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo: Zigurete, 2004.

VARGAS, M. R.; SILVA, V. P. **Resistência ao fogo das estruturas de aço**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2005.

VARGAS, M. R.; SILVA, V. P. **Resistência ao fogo das estruturas de aço**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia / Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2005.

VILA REAL, P. **Incêndio em estruturas metálicas**: Cálculo estrutural. Mafra: Orion. 2003.

WANG, Y. C. **Steel and composite structures**: behaviour and design for fire safety. Londres: Spon Press, 2005.