



UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE ALAGOAS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CAMPUS DO SERTÃO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

PAULO VINÍCIUS PEIXOTO MENEZES

**MÉTODO ADAPTADO DA ANÁLISE TÉRMICA DE ESTRUTURAS  
METÁLICAS, APLICADO ÀS ESTRUTURAS DE CONCRETO EM  
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Delmiro Gouveia  
2019

PAULO VINÍCIUS PEIXOTO MENEZES

**MÉTODO ADAPTADO DA ANÁLISE TÉRMICA DE ESTRUTURAS METÁLICAS, APLICADO ÀS ESTRUTURAS DE CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Alagoas – Campus Sertão, como requisito avaliativo necessário à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Alverlando Silva Ricardo

Delmiro Gouveia  
2019

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca do Campus Sertão**  
**Sede Delmiro Gouveia**

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza – CRB-4/2209

M543m Menezes, Paulo Vinícius Peixoto

Método adaptado da análise térmica de estruturas metálicas, aplicado às estruturas de concreto em situação de incêndio/ Paulo Vinícius Peixoto Menezes. – 2019.

70 f. : il.

Orientação: Prof. Me. Alverlando Silva Ricardo.  
Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2019.

1. Estruturas de concreto armado. 2. Análise térmica. 3. Dimensionamento. 4. Incêndio. I. Título.

CDU: 624.012.45



**UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE ALAGOAS**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**PAULO VINÍCIUS PEIXOTO MENEZES**

### **MÉTODO ADAPTADO DA ANÁLISE TÉRMICA DE ESTRUTURAS METÁLICAS, APLICADO À ESTRUTURAS DE CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

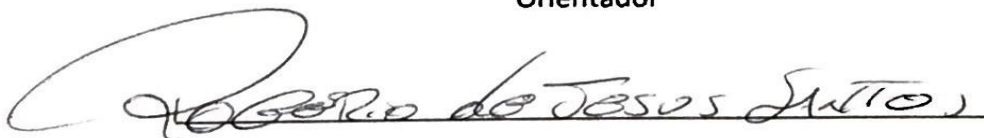
Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Alagoas – Campus Sertão, como requisito avaliativo necessário à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

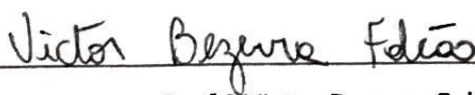
Orientador: Alverlando Silva Ricardo

Trabalho aprovado em 1 de Agosto 2019. Delmiro Gouveia.

#### **BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof.º Alverlando Silva Ricardo  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof.º Rogério de Jesus Santos  
Avaliador

  
\_\_\_\_\_  
Prof.º Victor Bezerra Falcão  
Avaliador

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais e irmãos,  
de todo o coração.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela luz derramada diariamente durante essa jornada.

Aos meus pais, por acreditarem em mim mesmo quando eu estava totalmente desacreditado.

Aos meus irmãos, por serem parte de mim. Em especial meu irmão mais velho, Fabio

Henrique, por me inspirar e motivar através do seu jeito de viver.

E à minha companheira, Cíntia Daniely, por me aturar e me levantar em todos os momentos.

“A Evolução é a Lei da Vida;  
O Número é a Lei do Universo;  
A Unidade é a Lei de Deus.”  
(Pitágoras)

## RESUMO

No Brasil, o dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio é realizado de uma maneira tabular simplificada. Porém o uso de tabelas em projetos estruturais com características diversas pode gerar elementos superdimensionados. Quando as estruturas de concreto são submetidas a elevadas temperaturas durante um incêndio, suas propriedades mecânicas se reduzem e perdem funcionalidades, podendo ocasionar situações catastróficas. Logo, é interessante que o projetista possa prever qual a temperatura máxima que um elemento estrutural é capaz de suportar. Assim, seria possível alterar as dimensões dos elementos ao ponto de reduzir as possibilidades de colapsos estruturais. Dessa forma o presente trabalho visa abordar um novo método para à análise térmica, buscando outros meios e caminhos para encontrar as temperaturas nos elementos estruturais de vigas de concreto. Para isso foi utilizado o método simplificado de aço encontrado na NBR 14323:2013, levando em conta também normas internacionais como o EUROCODE. Observou-se que, em vigas de menores dimensões, as temperaturas encontradas pelo método proposto são relativamente próximas das temperaturas encontradas nos ábacos das vigas correspondentes. Porém, para dimensões maiores do elemento de concreto, as temperaturas calculadas são menores do que as temperaturas encontradas na norma europeia, pois o calor se dispersa mais no elemento robusto e exige uma quantidade maior de calor para aquecê-los. Com isso, o aprimoramento dos métodos pode trazer mais discussão, e por fim precisão nos processos de análise térmica nas estruturas.

**Palavras-chave:** Análise térmica. Incêndio. Elemento estrutural. Concreto.



## **ABSTRACT**

In Brazil, the dimensioning of reinforced concrete structures in fire situation is realized in a way simplified tabular. The use of tables in structural designs with different characteristics can generate oversized elements. When the concrete structures are subjected to high temperatures during a fire, its mechanical properties are reduced and lose functionality, and can result in catastrophic situations. It is interesting that the designer can predict the maximum temperature that a structural element is capable of supporting. So, would it be possible to change the dimensions of the elements to the point of reducing the possibilities of structural collapses. Thus the present work aims to address a new method for thermal analysis, seeking other means and paths to find the temperatures in the structural elements of concrete beams. For this we used the simplified method of steel found in NBR 14323:2013, taking into account also the international standards as the EUROCODE. It was observed that, in smaller beams temperatures found by the proposed method are relatively close to the temperatures found in the corresponding abacuses. However, for larger dimensions of the concrete element, the calculated temperatures are lower than temperatures found in European standard, because the heat disperses more robust element and requires a greater amount of heat to warm them up. With that, the improvement of the methods can bring more discussion, and lastly accuracy in thermal analysis processes in the structures.

**Keywords:** Thermal Analysis. Fire. Structural element. Concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva de incêndio real. ....	20
Figura 2: Curva-padrão temperatura-tempo. ....	22
Figura 3: Fator de resistência do concreto em função da temperatura ....	31
Figura 4: Fator de resistência do aço da armadura em função da temperatura ....	33
Figura 5: Cobrimento e material de proteção no elemento estrutural de concreto.....	35
Figura 6: Incêndio atuando em três faces do elemento. ....	36
Figura 7: Curva da variação de temperatura da Viga 5, cobrimento 2 cm. ....	40
Figura 8: Curva da variação de temperatura da Viga 5, cobrimento 3 cm. ....	41
Figura 9: Curva da variação de temperatura da Viga 5, cobrimento 4 cm. ....	41
Figura 10: Curva da variação de temperatura da Viga 5, cobrimento 5 cm. ....	41
Figura 11: Curva da variação de temperatura da Viga 5, cobrimento 6 cm. ....	42
Figura 12: Vigas com 14 cm de largura, para o TRRF 30 min. ....	44
Figura 13: Vigas com 14 cm de largura, para o TRRF 60 min. ....	45
Figura 14: Vigas com 14 cm de largura, para o TRRF 90 min. ....	46
Figura 15: Vigas com 16 cm de largura, para o TRRF 30 min. ....	47
Figura 16: Vigas com 16 cm de largura, para o TRRF 60 min. ....	47
Figura 17: Vigas com 16 cm de largura, para o TRRF 90 min. ....	47
Figura 18: Vigas com 30 cm de largura, para o TRRF 60, 90 e 120 min.....	48
Figura 19: Comparação entre vigas de larguras 14, 16 e 19 cm, para o TRRF 30 min.....	49
Figura 20: Comparação entre todas as vigas de mesma largura, para o TRRF 60 min.....	50
Figura 21: Comparação entre todas as vigas, para o TRRF 90 min. ....	50
Figura 22: Comparação entre as vigas de 30, 40 e 50 cm, para o TRRF 120 min. ....	51
Figura 23: Comparação entre Ábaco e Viga de 16 cm, para o TRRF 30, 60 e 90 min. ....	52
Figura 24: Comparação entre Ábaco e Viga de 30 cm, para o TRRF 60 min.....	53
Figura 25: Comparação entre Ábaco e Viga de 30 cm, para o TRRF 90 min.....	54
Figura 26: Comparação entre Ábaco e Viga de 30 cm, para o TRRF 120 min.....	54
Figura 27: Comparação entre Ábaco e Viga de 50 cm, para o TRRF 90 min.....	55
Figura 28: Comparação entre Ábaco e Viga de 50 cm, para o TRRF 120 min.....	55
Figura 29: Temperaturas das vigas de 14 cm e 16 cm. ....	61
Figura 30: Temperaturas das vigas de 19 cm e 30 cm. ....	62
Figura 31: Temperaturas das vigas de 40 cm e 50 cm. ....	63

Figura 32: Curva temperatura x cobrimento em vigas de 50 cm, para TRRF 60, 90 e 120 min.... 64

Figura 33: Superfície da seção transversal para a qual são apresentados os ábacos com as linhas de temperaturas. (1) Superfície da linha de temperatura. (2) Seção transversal total..... 65

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Lista de Vigas com suas respectivas larguras e alturas. ....	34
Tabela 2: Fator de massividade das vigas 1, 2, 3 e 4 e seus cobrimentos relacionados. ....	39
Tabela 3: Fator de massividade das vigas 21- 24 e seus cobrimentos relacionados.....	40
Tabela 4: Resultados de temperaturas para vigas de 14 cm e 16 cm.....	43
Tabela 5: Temperatura variando com o cobrimento para TRRF's diferentes .....	52

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), em minuto. ....	23
Quadro 2: Fator de massividade para alguns elementos com material de revestimento. ....	28
Quadro 3: Valores para o fator de redução da resistência do concreto. ....	32
Quadro 4: Valores para o fator de redução da resistência do aço.....	33
Quadro 5: Coeficientes adotados nas análises.....	36

## LISTA DE SÍMBOLOS

fluxo de calor condutivo do elemento  
calor específico por unidade de massa do concreto em função da temperatura  
calor específico do aço  
calor específico do material de revestimento contra fogo  
resistência característica do concreto na temperatura  
resistência característica do concreto  
resistência característica do aço da armadura na temperatura  
resistência característica do aço da armadura  
fator de redução da resistência do concreto na temperatura  
fator de redução da resistência do aço na temperatura  
fator de correção para o efeito de sombreamento  
espessura do material de revestimento contra fogo  
perímetro efetivo do material de revestimento contra fogo, igual ao perímetro da face interna do material de revestimento, limitado às dimensões do elemento estrutural de aço  
fator de massividade para elementos estruturais de aço com revestimento contra o fogo  
temperatura do aço no tempo  
temperatura dos gases no tempo  
temperatura inicial dos gases  
condutividade térmica do concreto de densidade normal  
condutividade térmica do material de revestimento contra fogo  
massa específica do aço  
massa específica do material de revestimento contra fogo  
intervalo de tempo  
valor do fluxo de calor por unidade de área  
fluxo de calor convectivo absorvido pela superfície  
fluxo de calor radiante absorvido pela superfície  
 $t$  tempo  
área bruta da seção transversal do elemento estrutural  
perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural de aço

o fogo

fator de massividade para elementos estruturais de aço sem revestimento contra

variação da espessura na seção do elemento

variação da temperatura na seção do elemento

coeficiente de transferência de calor por convecção

emissividade resultante do elemento aquecido

temperatura

temperatura dos gases no ambiente em chamas

temperatura da superfície do elemento

condutividade térmica do material

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1. Motivação .....	18
1.2. Objetivos.....	19
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>20</b>
2.1. Comportamento térmico em situação de incêndio .....	20
2.2. Modelo de incêndio padrão .....	21
2.3. Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).....	22
2.4. Cálculo do TRRF.....	23
2.5. Transferência de calor .....	24
2.6. Segurança das estruturas em situação de incêndio .....	25
2.7. Elevação de temperatura no Aço .....	26
2.8. Fator de massividade .....	28
2.9. Propriedades físicas e térmicas.....	29
2.10. Propriedades mecânicas .....	30
2.10.1. Concreto .....	31
2.10.2. Aço.....	32
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>34</b>
3.1. Objetos de estudos .....	34
3.2. Adaptação aço-concreto .....	35
3.3. Curvas de temperatura.....	37
3.4. Curvas temperatura x cobrimento.....	38
3.5. Análise dos Ábacos .....	38
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>39</b>
4.1. Fatores de massividade.....	39
4.2. Curvas de variação temperatura x tempo .....	40
4.3. Curvas de variação de temperatura x cobrimento .....	44
4.4. Análise de vigas com larguras diferentes .....	49



4.5. Análises com os Ábacos .....	51
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>56</b>
5.1. Conclusões.....	56
5.2. Sugestões para trabalhos futuros .....	57
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A falha de um elemento estrutural é potencialmente desastrosa, pois pode levar à queda de parte da estrutura ou uma redistribuição imprevista de carga entre os demais elementos que, sobrecarregados, podem sofrer colapso progressivo (CALDAS, 2008). Sabendo que a probabilidade de um colapso estrutural em situação de incêndio é muito pequena, muitos projetistas de estruturas desconsideram essa possibilidade.

Junto a isso, temos a situação normativa referente ao tema muito pouco explorada, principalmente no Brasil (COSTA, 2008), causando certa subjetividade tanto para quem pretende considerar o incêndio no projeto, quanto àquele que precisa verificar a estrutura para situação de incêndio.

Para as estruturas de concreto armado, a norma NBR 15200:2012 – “Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio” recomenda e ilustra em seu corpo a aplicação do método tabular. A aplicação desse método tabular simplifica o trabalho do projetista, porém pode gerar estruturas com custo elevado e/ou com pouca segurança, por ser um método bastante genérico.

Um método alternativo e indicado pela NBR 15200:2012 é a aplicação de métodos simplificados que calcula o esforço resistente de cálculo em situação de incêndio de cada elemento com base na distribuição de temperatura obtida para sua seção transversal, considerando exposição ao fogo conforme o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).

Essa distribuição de temperatura pode ser obtida ou calculada em programas específicos ou por meio da literatura técnica, como por exemplo, na NBR 14323:2013 – “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio”. O método simplificado, apresentado pela NBR 14323:2013, utiliza equações de transferência de calor.

A ação térmica nas estruturas é descrita pela soma dos fluxos de calor convectivo e radiante, produzidos pela diferença entre a temperatura do elemento estrutural “frio” e a temperatura dos gases quentes no compartimento em chamas (COSTA, 2008).

Essa variação térmica na estrutura gera a redução do módulo de elasticidade, da rigidez e da resistência na estrutura (SILVA, 2012). Dessa forma, deve-se analisar qual o tempo ou temperatura a estrutura pode suportar de maneira que seus usuários e bombeiros possam circular com segurança durante o sinistro.

---

Neste sentido, o presente trabalho propõe analisar a variação de temperatura na seção transversal de uma viga de concreto armado como elemento estrutural. A metodologia para a determinação da variação de temperatura é feita com base nas equações de transferência de calor fornecidas pela norma de dimensionamento de estruturas de aço em incêndio, NBR 14323:2013.

Para isso, uma breve revisão sobre o estudo das estruturas em incêndio é realizada no capítulo 2. Em seguida, no capítulo 3, são definidos os procedimentos metodológicos necessários para a obtenção e análise dos resultados, que se encontram no capítulo 4. As conclusões com a pesquisa realizada e sugestões para trabalhos futuros são expostas no capítulo 5.

### **1.1. Motivação**

Além dos riscos aos indivíduos e à sociedade, um incêndio em uma edificação ameaça também às propriedades circunvizinhas e à própria propriedade, gerando possíveis perdas financeiras e de vidas. Dessa forma, o prejuízo relacionado ao acidente do incêndio é considerável, e precisa ser tratado com mais atenção.

Na maior parte dos países desenvolvidos, os custos das perdas devido a incêndios têm reduzido gradativamente. O progresso é mais evidente nos países que tiveram os maiores índices de vítimas fatais na década de 80 e, naturalmente, investiram na segurança contra incêndio das edificações (WORLD FIRE STATISTICS, 2003).

As normas NBR 15200:2012, NBR 14432:2001e a NBR 14323:2013, utilizam como base as normas internacionais (como o EUROCODE), adaptadas às características nacionais, e apresentam vários conceitos e direcionamentos de cálculos. As normas internacionais também têm sido referencia para a elaboração de códigos normativos estaduais. Com isso, fica evidente a necessidade de mais pesquisas e investimentos na área de estruturas em situação de incêndio aqui no Brasil.

Para a situação de incêndio, o projeto envolve as variáveis da Termodinâmica e Transferência de Calor, além das mesmas variáveis da Mecânica das Estruturas à temperatura ambiente, porém, afetadas pela temperatura elevada dos materiais (COSTA, 2008).

Ou seja, independente do método simplificado que o projetista adotar, incluindo também as normas internacionais, a análise térmica é um ponto chave dos cálculos. As temperaturas atingidas pelo incêndio e as máximas temperaturas nos elementos estruturais ditam como o

projeto ou a análise estrutural devem ser. Portanto, o presente trabalho visa uma melhor compreensão do comportamento térmico estrutural.

## **1.2. Objetivos**

- O objetivo principal deste trabalho será adaptar a análise térmica do método simplificado (NBR 14323:2013), que determina as temperaturas de um elemento metálico, para encontrar as temperaturas de um elemento estrutural de concreto armado.

Alguns objetivos específicos serão:

- Encontrar as temperaturas na seção de um elemento estrutural de concreto.
  - Comparar os resultados (temperaturas) dos diferentes elementos entre si, e posteriormente com os Ábacos presentes na Norma Europeia EN 1992-1-2: Eurocode 2.
  - Identificar as principais diferenças comportamentais em situação de incêndio entre o aço e o concreto, como suas propriedades físicas e térmicas.
  - Compreender o modelo de incêndio padrão, e o comportamento térmico em uma viga de concreto armado em situação de incêndio.
-

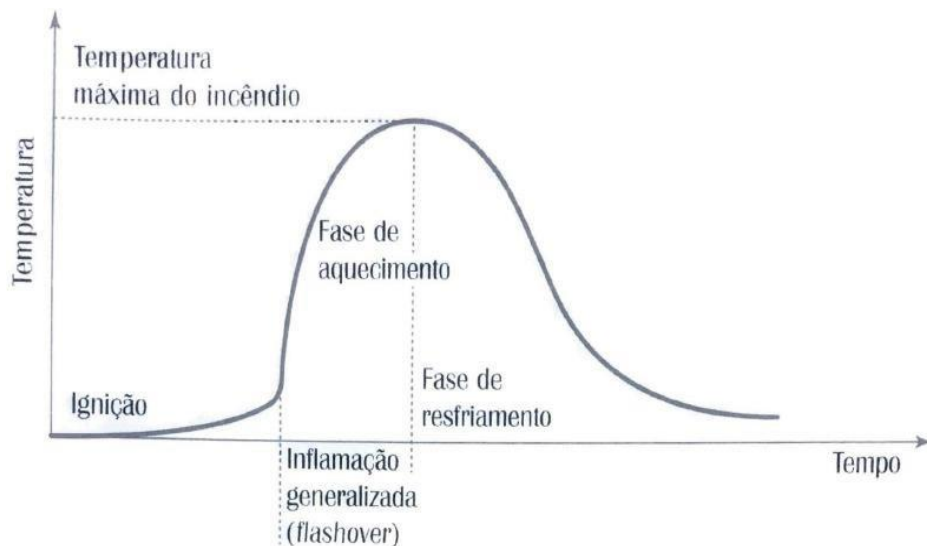
## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Comportamento térmico em situação de incêndio

O chamado triângulo do fogo simboliza os três elementos que devem estar continuamente presentes para a ocorrência da combustão: combustível, calor e oxigênio. Caso algum desses elementos seja removido, o processo de combustão não se sustenta e o fogo é extinto. Nos incêndios, a combustão pode ser completa gerando como produto apenas dióxido de carbono e água, ou incompleta. Na combustão incompleta não há suprimento suficiente de oxigênio sendo evidenciada pela geração de fumaça. Diferentemente da combustão completa, a reação com o oxigênio gera inúmeros produtos e subprodutos (CALDAS, 2008).

Uma característica importante de um incêndio é a curva que fornece a temperatura média dos gases quentes, em função do tempo em que o incêndio acontece (Figura 1). A curva se divide em fase de ignição, que tem baixa temperatura, fase de aquecimento e fase de resfriamento.

Figura 1: Curva de incêndio real.



Fonte: Silva (2012)

A curva real de incêndio apresenta um ramo inicial marcado pelo início da inflamação, onde o crescimento da temperatura acontece de forma gradual. Essa fase, denominada pré-flashover, não apresenta risco à estrutura. Porém, a formação de gases tóxicos gerados pela combustão dos materiais pode apresentar riscos à vida humana (SOUZA E SILVA, 2015).

Com a continuação do incêndio haverá um instante de inflamação generalizada, conhecido como flashover, onde toda a carga combustível presente no ambiente entra em ignição. A partir deste momento ocorre uma rápida elevação da temperatura até que se atinja a temperatura máxima do incêndio (SOUZA E SILVA, 2015).

E por fim, depois que todo o material combustível é consumido e o incêndio atinge suas temperaturas máximas, haverá uma redução gradativa da temperatura dos gases, definindo a fase de resfriamento (SOUZA E SILVA, 2015).

A favor da segurança, é usual admitir-se que a temperatura do ambiente em chamas atinge sempre seu valor máximo, e a estrutura deve ser verificada para tal situação (SILVA, 2012).

## **2.2. Modelo de incêndio padrão**

A modelagem do incêndio tem como objetivo obter a temperatura dos gases quentes de um ambiente em chamas. Dentre as opções de modelos disponíveis para a análise dinâmica do incêndio, Caldas (2008), Franssen (2009) e Bailey (2011) destacam as seguintes: Incêndio Padrão, Incêndio Natural, Incêndio Localizado, Modelos de Zona e Fluidodinâmica Computacional (Computational Fluid Dynamics - CFD). Dentre esses modelos, a curva padronizada é a comumente adotada e indicada pelos códigos normativos.

A característica principal da curva padronizada (Figura 2) é a de possuir apenas um ramo ascendente, admitindo, portanto, que a temperatura dos gases é sempre crescente com o tempo e, além disso, independente das características do ambiente e da carga de incêndio (SILVA, 2012).

As normas brasileiras ABNT NBR 14432 e ABNT NBR 5628 recomendam a equação 2.3 para a elevação padronizada da temperatura em função do tempo, com base na ISO 834 (1990).

(2.1)

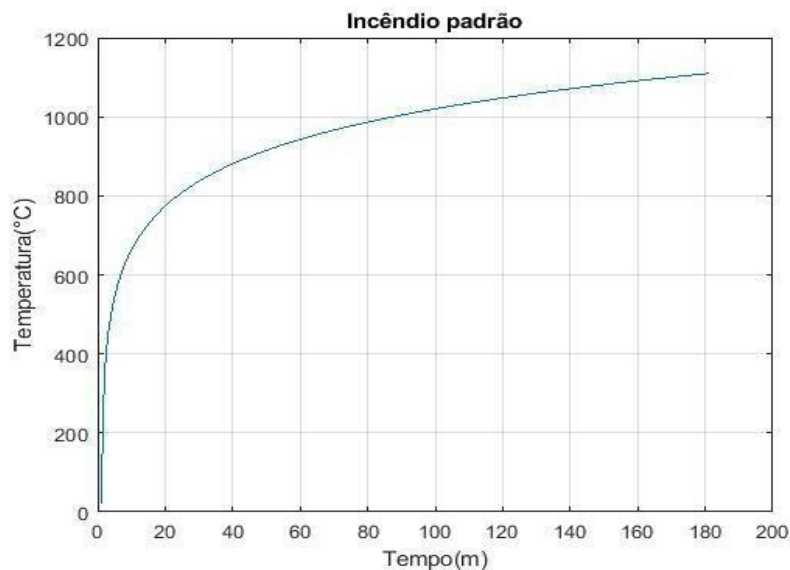
Onde:

= temperatura dos gases no ambiente em chamas [°C];

= temperatura dos gases no instante  $t = 0$ , geralmente 20°C [°C];

$t$  = tempo [minuto];

Figura 2: Curva-padrão temperatura-tempo.



Fonte: O autor (2019)

### 2.3. Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)

O TRRF é definido como o tempo mínimo de resistência ao fogo, de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão. Resistência ao fogo é a propriedade de um elemento de construção de resistir à ação do fogo por determinado período de tempo, mantendo a sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento (NBR 14432:2001).

O TRRF é avaliado e por simplicidade trata-se de um valor que é função do risco de incêndio e de suas consequências, não se trata, portanto, do tempo de duração do incêndio ou tempo resposta do Corpo de Bombeiros ou Brigada de Incêndio. O TRRF é um tempo que pode ser calculado segundo a Teoria das Estruturas e a Transferência de Calor ou encontrado experimentalmente (COSTA & SILVA, 2003).

## 2.4. Cálculo do TRRF

Os TRRF dos elementos construtivos são fornecidos pelas instruções técnicas (ITs) do corpo de bombeiros, ou pela NBR 14432:2001, em forma de tabelas (Quadro 1) ou através do método do tempo equivalente (MTE). O MTE original detalhado, vem do Eurocode 1 (EN 1991-1-2:2002), no qual as normas brasileiras e os ITs tomaram por base.

No método tabular (NBR 14432:2001), os TRRF foram determinados de forma empírica em função das dimensões e do tipo de utilização do edifício.

A coluna divisão no Quadro 1 indica todos os tipos de ocupações/ usos de análise, podendo ser encontrada suas descrições no anexo B da mesma norma NBR 14432:2001.

Quadro 1: Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), em minuto.

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Profundidade do subsolo		Altura da edificação				
			Classe S <sub>2</sub> h <sub>s</sub> > 10 m	Classe S <sub>1</sub> h <sub>s</sub> ≤ 10 m	Classe P <sub>1</sub> h ≤ 6 m	Classe P <sub>2</sub> 6 m < h ≤ 12 m	Classe P <sub>3</sub> 12 m < h ≤ 23 m	Classe P <sub>4</sub> 23 m < h ≤ 30 m	Classe P <sub>5</sub> h > 30 m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercial varejista	C-1 a C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6 e F-8	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 a H-5	90	60	30	60	60	90	120
I	Industrial	I-1	90	60 (30)	30	30	60	90	120
		I-2	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
J	Depósitos	J-1	90	60 (30)	30	30	30	30	60
		J-2	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120

Fonte: NBR 14432 (2001)



## 2.5. Transferência de calor

Em situação de incêndio, a ação térmica é excepcional e deve ser considerada no projeto estrutural. Para tal situação a ação térmica é descrita pelos fluxos de calor por radiação e por convecção nos elementos estruturais (SILVA, 2004). A ação térmica é provocada pela diferença de temperatura entre os gases quentes do ambiente em chamas e o elemento estrutural “frio”.

Independente do cenário de incêndio, a transferência de calor da atmosfera quente para um elemento estrutural de um compartimento é governada pelas leis da transferência de calor por convecção, radiação e condução (COSTA, 2008).

“A radiação é um processo pelo qual o calor é transmitido de um corpo a alta temperatura para um de mais baixa quando tais corpos estão separados no espaço, ainda que exista vácuo entre eles” (KREITH e BOHN, 1977).

Ou seja, a radiação é propagada por meio de ondas eletromagnéticas pelos corpos em chamas e a parcela absorvida pela radiação propagada é definida pela equação 2.3.

(2.3)

Onde:

= fluxo de calor radiante absorvido pela superfície [W/m<sup>2</sup>];

= emissividade resultante do elemento aquecido [adimensional];

= temperatura dos gases [°C];

= temperatura da superfície do elemento [°C];

Para o concreto, o Eurocode 2 (EN 1992-1-2:2004) sugere = 0,7; para materiais de emissividade desconhecida, o Eurocode 1 (EN 1991-1-2:2002) sugere o valor = 0,8.

A convecção é o processo onde o calor flui pela movimentação e mistura de um fluido. No caso de um incêndio o fluido são os gases quentes do ambiente. Dentro do compartimento, as massas de gases quentes, mais leves, tendem a subir, enquanto as massas de gases frios, menos leves, tendem a descer, devido à diferença de densidade e à ação da gravidade (COSTA, 2008). O fluxo de calor por convecção é calculado pela equação 2.4.

(2.4)

Onde:

- = fluxo de calor convectivo absorvido pela superfície [ $W/m^2$ ];
- = coeficiente de transferência de calor por convecção [ $W/m^2/^\circ C$ ];

Para a curva natural o valor de  $\alpha = 35$  e para a curva padrão  $\alpha = 25$ , informa o Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2002).

“A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato físico direto” (KREITH e BOHN, 1977).

No que diz respeito à condução, esse efeito determina a velocidade do fluxo de calor dentro do material. E é definido pela equação 2.5.

(2.5)

Onde:

- = fluxo de calor condutivo do elemento [ $W/m^2$ ];
- = condutividade térmica do material [ $W/m/^\circ C$ ];
- = variação da temperatura na seção do elemento [ $^\circ C$ ];
- = variação da espessura na seção do elemento [m];

## 2.6. Segurança das estruturas em situação de incêndio

Segundo Brentano (2011), os principais objetivos do Projeto de Prevenção e Combate a Incêndio devem ser a proteção da vida humana, a proteção do patrimônio e, por último, a continuidade do processo produtivo.

Ainda segundo Brentano (2011), as medidas de proteção da edificação ao fogo podem ser classificadas em passivas e ativas.

As medidas de proteção passiva são aquelas tomadas durante a fase de elaboração do projeto arquitetônico e de seus complementares, com o objetivo de evitar ao máximo a ocorrência de um foco de incêndio, e, caso aconteça, reduzir as condições propícias para o seu crescimento e alastramento para o resto da edificação e para as edificações vizinhas (GOMES, 2014).

As medidas de proteção ativa, também chamadas de medidas de combate, são aquelas tomadas quando o fogo já está ocorrendo. São sistemas e equipamentos que devem ser acionados e operados, de forma manual ou automática, para combater o foco de fogo, com o objetivo de extingui-lo ou, em último caso, mantê-lo sob controle até sua auto-extinção, e também auxiliar na saída dos ocupantes da edificação com segurança e rapidez (GOMES, 2014).

Risco à vida pode ser entendido como a exposição severa à fumaça ou ao calor dos usuários da edificação e o desabamento parcial ou total dos elementos estruturais sobre os usuários ou equipes de oficiais de combate (SILVA, 2012).

A principal causa de óbitos, em incêndio, é a exposição à fumaça que ocorre nos primeiros momentos do sinistro. Assim, a segurança à vida depende prioritariamente da rápida desocupação do ambiente em chamas (SILVA, 2012).

A norma NBR 14432:2001 trás esses instrumentos na denominação de proteção ativa e proteção passiva. A proteção ativa é o tipo de proteção contra incêndio que precisa ser ativada manual ou automaticamente em resposta ao fogo. No caso da proteção passiva, é definida como o conjunto de medidas incorporado ao sistema construtivo do edifício, sendo funcional durante o uso normal da edificação e que reage passivamente ao fogo, evitando seu crescimento e propagação.

## 2.7. Elevação de temperatura no Aço

Na NBR 14323:2013 é possível encontrar duas equações de elevação de temperatura de um elemento estrutural metálico pertencente a estruturas internas. Uma primeira equação trata elementos estruturais sem revestimento contra o fogo, e a segunda trata de elementos estruturais envolvidos com revestimento contra o fogo.

Portando, à distribuição uniforme de temperatura na seção transversal, a elevação de temperatura, em graus Celsius, de um elemento estrutural de aço sem revestimento contra fogo, situado no interior da edificação, durante um intervalo de tempo , pode ser determinada por:

$$(2.6)$$

Onde:

= fator de correção para o efeito de sombreamento, pode ser tomado igual a 1,0;

= fator de massividade para elementos estruturais de aço sem revestimento contra o fogo [ ];

= perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural de aço [m];

= área bruta da seção transversal do elemento estrutural [m<sup>2</sup>];

= calor específico do aço [J/kg/°C];

= massa específica do aço [kg/m<sup>3</sup>];

= + ; valor do fluxo de calor por unidade de área [W/m<sup>2</sup>];

= intervalo de tempo [s];

Um importante detalhe normativo é a respeito da variação de tempo , onde cita que o seu valor não pode ser tomado como maior que 5 segundos.

Já para uma distribuição uniforme de temperatura na seção transversal, de um elemento estrutural envolvido por material de revestimento contra fogo, a variação de temperatura pode ser determinada por:

$$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\alpha} \left( \frac{1}{\rho c} \frac{dQ}{dt} \right)} \quad (2.7)$$

Com:

\_\_\_\_\_

Onde:

= fator de massividade para elementos estruturais de aço com revestimento contra o fogo [ ];

= perímetro efetivo do material de revestimento contra fogo, igual ao perímetro da face interna do material de revestimento, limitado às dimensões do elemento estrutural de aço [m];

= calor específico do material de revestimento contra fogo [J/kg/°C];

= espessura do material de revestimento contra fogo [m];

= temperatura do aço no tempo t [°C];

= temperatura dos gases no tempo t [°C];

= condutividade térmica do material de revestimento contra fogo [kg/m<sup>3</sup>];

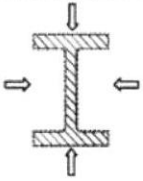
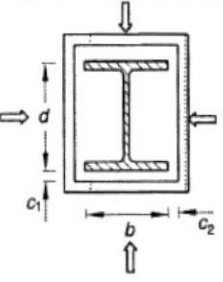
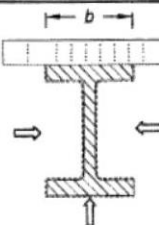
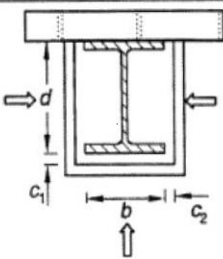
= massa específica do material de revestimento contra fogo [kg/m<sup>3</sup>];

= intervalo de tempo [s];

## 2.8. Fator de massividade

O fator de massividade como já foi expresso anteriormente, é a relação entre o perímetro exposto ao fogo (perímetro da face interna do material de proteção) e a área da seção da peça. A NBR 14323:2013 trás as expressões de fatores de massividade para alguns perfis metálicos, e também com ou sem proteção térmica. Conforme se observa no Quadro 2.

Quadro 2: Fator de massividade para alguns elementos com material de revestimento.

Situação	Descrição	Fator de massividade ( $u_m/A_g$ )
	Seção com revestimento tipo contorno, de espessura uniforme, exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço}}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com revestimento tipo caixa <sup>a)</sup> , de espessura uniforme, exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{2(b+d)}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com revestimento tipo contorno de espessura uniforme, exposta ao incêndio por três lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço} - b}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com revestimento tipo caixa <sup>a)</sup> de espessura uniforme, exposta ao incêndio por três lados	$\frac{2d+b}{\text{área da seção da peça de aço}}$

<sup>a</sup> Válido apenas para  $c_1$  e  $c_2$  inferiores ou iguais a  $d/4$ .

Fonte: NBR 14323 (2013)

## 2.9. Propriedades físicas e térmicas

À temperatura elevada, acima dos 100 °C, a heterogeneidade do concreto é realçada pelas transformações físicas, químicas e mineralógicas envolvendo a pasta de cimento, os agregados e o aço (COSTA, 2008).

Propriedades como o calor específico, condutividade térmica, massa específica, são essenciais para as análises térmicas na seção dos elementos estruturais. A expansão térmica também é importante, porém por ter seus efeitos pequenos são desprezados em algumas análises.

A massa específica do concreto depende da massa específica dos agregados e do teor de umidade livre para o intervalo  $20\text{ °C} \leq \leq 150\text{ °C}$ . A massa específica do concreto endurecido pode sofrer uma ligeira redução causada por dois motivos. Primeiro pela evaporação da água livre, causada pela temperatura elevada em uma situação de incêndio. Segundo pelo aumento do volume devido à expansão térmica (COSTA, 2008).

As normas brasileiras não trazem informações sobre a massa específica do concreto de densidade normal, às temperaturas elevadas. Apesar de o Eurocode 2 (EM 1992-1-2:2004) trazer uma equação que pode ser aplicada tanto em agregados silicosos como calcários, há de se observar que o impacto da variação da massa específica sobre as propriedades térmicas é mínimo, podendo considerar o valor constante e igual à massa específica à temperatura ambiente.

A massa específica  $\rho_{m, T}$  é recomendada para análises térmicas das seções dos elementos de concreto (COSTA, 2008).

Já o calor específico, também chamado de capacidade térmica, pode ser determinado por:

(2.8)

Onde:

$c_{m, T}$  = calor específico por unidade de massa do concreto em função da temperatura [J/kg/°C];

É sabido que a condutividade térmica do concreto reduz com o aumento da temperatura. O tipo de agregado está ligado diretamente às características dela, por constituir cerca de 70% do concreto endurecido (CALLISTER Júnior, 2002).

As normas brasileiras não definem valores para a condutividade térmica, sendo o Eurocode 2 (EN 1992-1-2:2004) uma norma internacional que fornece as equações correspondentes aos limites da condutividade térmica do concreto. As equações 2.9 e 2.10 mostram os limites inferior e superior para a condutividade, respectivamente.

$$\text{---} \qquad \text{---} \qquad (2.9)$$

$$\text{---} \qquad \text{---} \qquad (2.10)$$

Onde:

= condutividade térmica do concreto de densidade normal [W/m°C];

= temperatura [°C];

## 2.10. Propriedades mecânicas

Para a análise estrutural as resistências à compressão e à tração, as relações tensão-deformação e o módulo de elasticidade dos materiais são as propriedades mecânicas mais importantes.

As propriedades mecânicas dos materiais a temperaturas elevadas são determinadas por meio de ensaios em regimes de aquecimento constante ou transiente. Para aquecimento constante, existe um período de aquecimento até o nível de temperatura de interesse; depois da uniformização da temperatura do corpo, a carga é aplicada. Já no regime transiente, também com a variação da temperatura, a carga é aplicada simultaneamente ao corpo de prova. (COSTA, 2008).

Portanto o regime que caracteriza a situação de incêndio é o regime transiente. Um regime mais realista para fornecer resposta do material e dos elementos estruturais.

### 2.10.1. Concreto

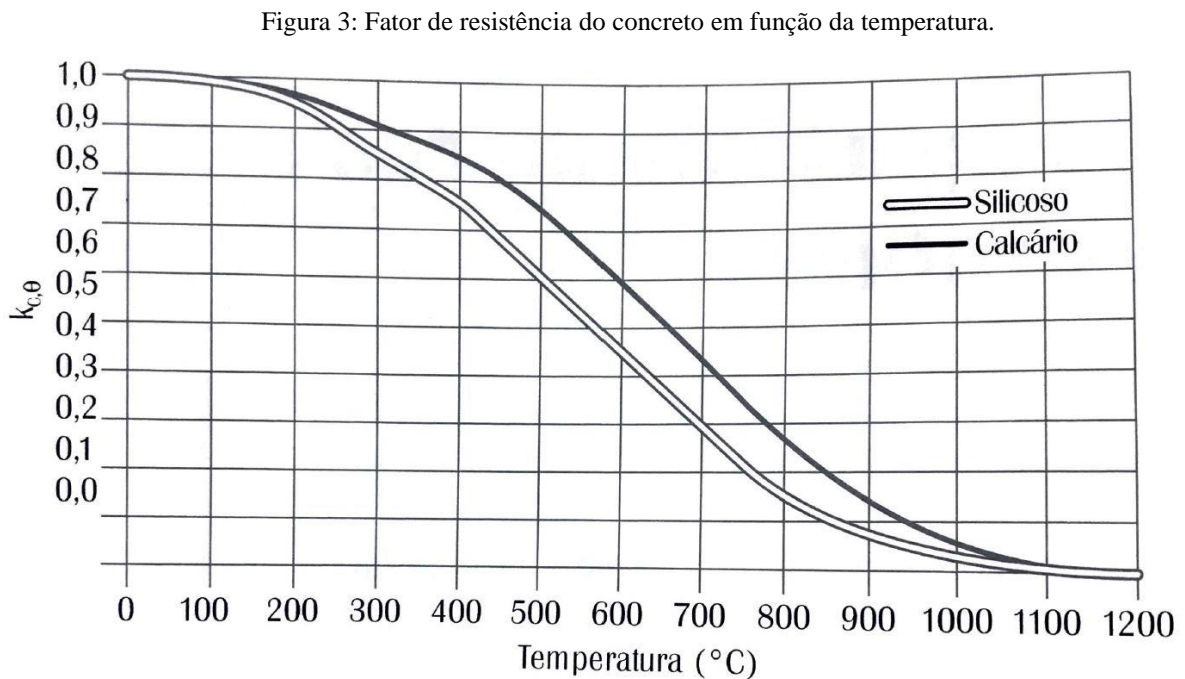
A resistência à compressão do concreto decresce com o aumento da temperatura (Figura 3), encontrada através da seguinte equação:

$$(2.11)$$

Onde:

- = resistência característica do concreto na temperatura [kN/cm<sup>2</sup>];
- = fator de redução da resistência do concreto na temperatura [adimensional];
- = resistência característica do concreto [kN/cm<sup>2</sup>];

A Figura 3 e o Quadro 3 mostram a variação do coeficiente em função da temperatura a depender do tipo de agregado. Para valores intermediários de temperatura, pode-se fazer interpolação linear.



Fonte: Silva (2012)



Quadro 3: Valores para o fator de redução da resistência do concreto.

Temperatura do concreto, $\theta$ °C	Agregado silicioso		Agregado calcáreo	
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$
1	2	3	4	5
20	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00
200	0,95	0,90	0,97	0,94
300	0,85	0,72	0,91	0,83
400	0,75	0,56	0,85	0,72
500	0,60	0,36	0,74	0,55
600	0,45	0,20	0,60	0,36
700	0,30	0,09	0,43	0,19
800	0,15	0,02	0,27	0,07
900	0,08	0,01	0,15	0,02
1 000	0,04	0,00	0,06	0,00
1 100	0,01	0,00	0,02	0,00
1 200	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: NBR 15200(2012)

### 2.10.2. Aço

A alteração das propriedades da resistência ao escoamento e rigidez do aço na armadura passiva pode ser vista na Figura 4 e no Quadro 4. Para valores intermediários de temperatura, pode ser feita interpolação linear. Os valores da nova resistência podem ser obtidos através de:

(2.12)

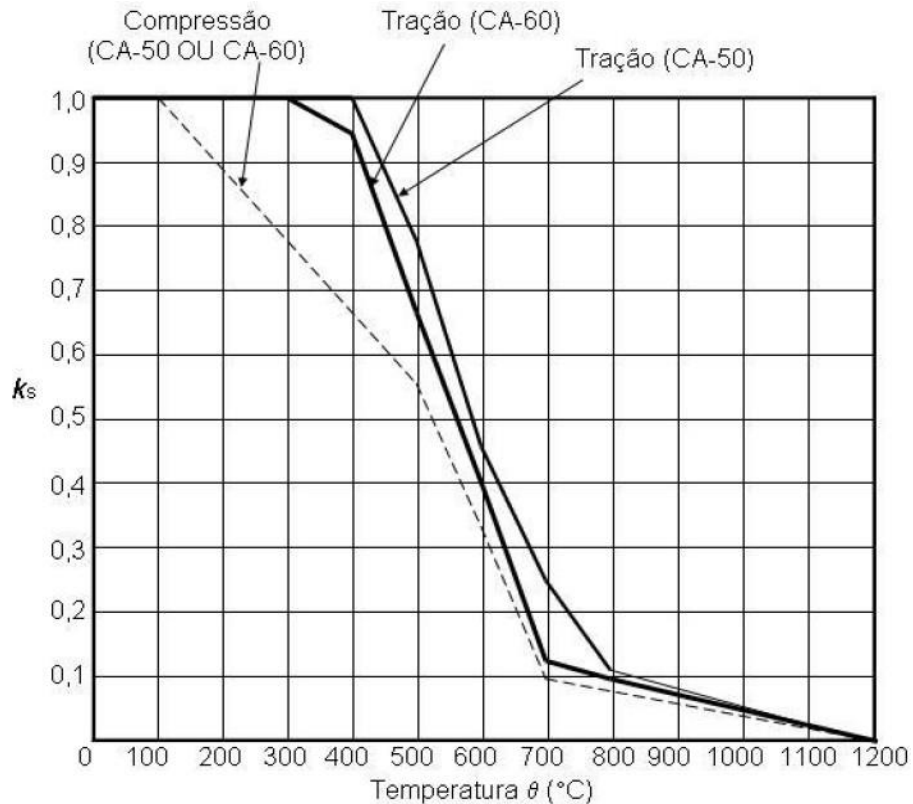
Onde:

= resistência característica do aço da armadura na temperatura [kN/cm<sup>2</sup>];

= fator de redução da resistência do aço na temperatura [adimensional];

= resistência característica do aço da armadura [kN/cm<sup>2</sup>];

Figura 4: Fator de resistência do aço da armadura em função da temperatura.



Fonte: NBR15200 (2012)

Quadro 4: Valores para o fator de redução da resistência do aço.

Temperatura do aço, $\theta$ °C	$f_{y,\theta}/f_{yk}$			$E_{s,\theta}/E_s$	
	Tração		Compressão CA-50 ou CA-60	CA-50	CA-60
	CA-50	CA-60			
1	2	3	4	5	6
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,89	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,78	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,67	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,56	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,33	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,10	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,08	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,06	0,07	0,05
1 000	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03
1 100	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
1 200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: NBR 15200(2012)

### 3. METODOLOGIA

Avaliando a equação de elevação de temperatura do aço com proteção térmica (equação 2.7), disponibilizada pela NBR 14323:2013, para elementos de aço. A abordagem feita para a adaptação da equação para elementos de concreto se fez necessária e todos os parâmetros da equação foram utilizados para elemento de concreto.

#### 3.1. Objetos de estudos

No presente trabalho foi utilizada a viga como elemento estrutural. Porém isto não impede de ser utilizado qualquer outro tipo de elemento, fazendo os devidos ajustes. Com o elemento definido, foram escolhidas seis larguras diferentes para as vigas (14 cm, 16 cm, 19 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm), para serem analisadas desde vigas mais curtas como vigas mais largas.

Posteriormente variou-se a altura de cada um dos seis tipos de vigas em quatro valores, para analisar qual a influência das dimensões na distribuição de temperatura. Obtendo assim um total de 24 vigas a serem expostas ao fogo e à equação de variação de temperatura. Conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1: Lista de Vigas com suas respectivas larguras e alturas.

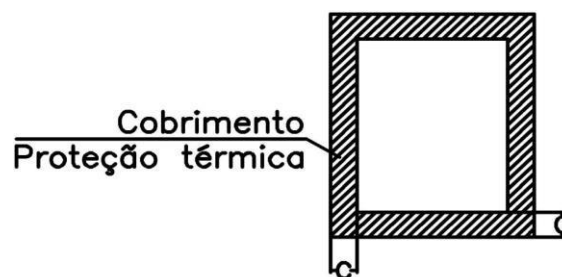
Nome	Largura [cm]	Altura [cm]
Viga 1	14	20
Viga 2	14	30
Viga 3	14	40
Viga 4	14	50
Viga 5	16	20
Viga 6	16	30
Viga 7	16	40
Viga 8	16	50
Viga 9	19	20
Viga 10	19	30
Viga 11	19	40
Viga 12	19	50
Viga 13	30	40
Viga 14	30	50
Viga 15	30	60
Viga 16	30	70
Viga 17	40	50
Viga 18	40	60
Viga 19	40	70
Viga 20	40	80
Viga 21	50	60
Viga 22	50	70
Viga 23	50	80
Viga 24	50	90

Fonte: O Autor (2019)

### 3.2. Adaptação aço-concreto

O material de proteção aplicado no aço, e utilizado para diminuir a temperatura no elemento estrutural, será exatamente o próprio elemento de concreto (Figura 5). Ou seja, o cobrimento da seção de concreto foi tido como o “material de proteção térmica”. Então a largura de cobrimento da seção do elemento, entra como valor da espessura do material de proteção térmica na equação de variação de temperatura.

Figura 5: Cobrimento e material de proteção no elemento estrutural de concreto.



Fonte: O Autor (2019)

Com isto, variando o cobrimento (sempre analisado em centímetros) da seção é possível encontrar diferentes temperaturas de uma mesma seção de concreto, simulando um aumento de material de proteção térmica para o aço.

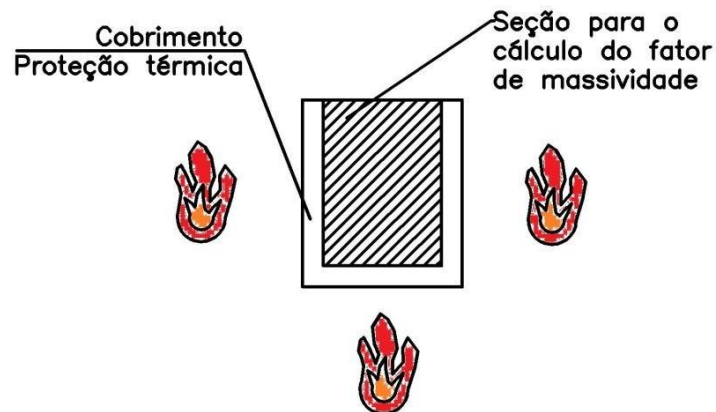
A espessura do cobrimento foi variada de 2 cm, o menor valor normativo permitido para estruturas de concreto armado, até 6,5 cm, o maior valor abordado pela NBR 15200:2004.

O fator de massividade calculado para o elemento metálico leva em conta o perímetro e a área da seção exposta ao fogo, que pode acontecer, por exemplo, em dois, três ou até quatro lados do elemento. Observando que a seção de uma peça de concreto estará sempre relacionada à largura e altura do elemento apenas, diferente das seções dos elementos de aço onde existem variados perfis, o fator de massividade, calculado pela equação, sempre estará relacionado às mesmas larguras e alturas da peça.

Portanto o fator de massividade foi calculado com a seção restante de concreto (Figura 6), retirando o cobrimento (considerado proteção térmica). Como no elemento metálico, onde

retirando a proteção térmica, resta apenas o perfil de aço no interior do elemento estrutural para ser analisado.

Figura 6: Incêndio atuando em três faces do elemento.



Fonte: O Autor (2019)

Para a aplicação dos cálculos foi considerado o incêndio atuando em três faces das vigas.

Ao variar o cobrimento de cada viga, o fator de massividade também é alterado, precisando ser recalculado. Pois as dimensões das vigas foram mantidas constantes, então a variação existente apenas acontece com a relação entre o cobrimento e a seção interna restante.

As propriedades internas e externas dos materiais, ou seja, da seção sem o cobrimento (interna) e do cobrimento da seção (externa), vão ser as mesmas por se tratarem do mesmo material de análise, o concreto. É possível observar isso no Quadro 5 que se segue:

Quadro 5: Coeficientes adotados nas análises.

Calor específico do concreto		1100 [J/kg/°C]
Densidade do concreto		2400 [kg/m <sup>3</sup> ]
Temperatura ambiente		20 [°C]
Calor específico do Material de proteção		1100 [J/kg/°C]
Densidade do Material de proteção		2400 [kg/m <sup>3</sup> ]
Espessura do Material de proteção	varia	[m]
Condutividade Térmica do Material		1,333 [W/m°C]

Fonte: O Autor (2019)

O valor do calor específico do material de proteção é justificado como igual a 1100 J/kg/°C, pois as temperaturas na margem externa da seção sempre serão altas. Já as temperaturas da seção interna do concreto por vezes estão altas e outras tantas vezes amenas. Porém seu valor também foi considerado igual a 1100 J/kg/°C.

A condutividade térmica do material de proteção, que é o próprio concreto, foi adotada a favor da segurança como um valor padrão máximo e constante. Mesmo ciente de que seu valor varia em função da temperatura.

### **3.3. Curvas de temperatura**

No entanto, antes de finalizar e aplicar a variação de temperatura do elemento em si, é preciso calcular a temperatura dos gases do ambiente, seguindo a curva padrão de incêndio, pois essa temperatura também faz parte da equação. Então foi gerada a curva padrão utilizando a equação 2.1, para modelagem do incêndio padrão.

Posteriormente foi aplicada uma variação de tempo de 5 segundos (exigido por norma), para cada uma das vigas, através da equação adaptada de variação de temperatura, e encontrada uma curva de temperatura que representa a elevação de temperatura do elemento estrutural ao longo do tempo.

Com isso, utilizando TRRF diferentes (30, 60, 90, 120), é possível obter valores de temperaturas diferentes, para cada uma das vigas, e para cada cobertura específico desejado.

Da Viga 1 à Viga 12 foi calculado para TRRF de 30, 60 e 90 minutos. Já da Viga 13 à Viga 24 foi calculado para TRRF de 60, 90 e 120 minutos. Pois as vigas mais largas precisam de temperaturas maiores para serem influenciadas.

Finalmente, com os parâmetros definidos e calculado o fator de massividade para cada cobertura respectivo de cada uma das vinte e quatro vigas, plotada a curva de distribuição de temperaturas ao longo do tempo e definido qual o TRRF, é possível encontrar a temperatura do elemento desejado.

### **3.4. Curvas temperatura x cobrimento**

Com os valores de temperaturas das vigas obtidos, para cada cobrimento e TRRF variado, foi feita a comparação desses valores entre si.

Primeiro os valores de temperaturas foram comparados entre os conjuntos de vigas de mesma largura, para identificar a influencia da altura na variação de temperatura. E assim gerado curvas temperatura x cobrimento para uma melhor avaliação.

Depois foi escolhida apenas uma viga de cada largura diferente, e também comparado os valores entre si, para entender melhor o comportamento da variação térmica tanto nas vigas mais curtas quanto nas mais largas, também através de curvas de temperatura x cobrimento.

### **3.5. Análise dos Ábacos**

A norma europeia EN 1992-1-2: Eurocode 2, disponibiliza alguns ábacos para o cálculo da temperatura ao longo da seção de concreto, para projetistas de elementos em situação de incêndio. Com isso, é possível utilizá-los para comparar com as temperaturas encontradas nas vigas correspondentes as mesmas dimensões. Também será possível encontrar alguns ábacos desta norma nos anexos.

O método de cálculo pelos Ábacos é bastante impreciso, pois se resume a observar na posição requerida qual a temperatura específica. Portanto, podem ocorrer variações na abordagem, trazendo valores próximos, porém com uma margem de erro que depende de quem consulta o ábaco.

Portanto, calculado o valor da temperatura na viga específica, e calculado o valor no ábaco, para a mesma viga e nas mesmas condições de TRRF e cobrimento, foi possível comparar seus valores para verificar a validade do método.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Fatores de massividade

Os valores dos fatores de massividade, a depender do cobrimento, para o conjunto de vigas de 14 cm e 50 cm são expostos na Tabela 2 e Tabela 3.

É possível ressaltar ainda que na utilização deste método para o aço, o fator de massividade se mantém constante independente do valor da espessura do material de proteção adotado, pois o perfil do elemento de aço não se altera.

Tabela 2: Fator de massividade das vigas 1, 2, 3 e 4 e seus cobrimentos relacionados.

Fator de massividade b = 14 cm				
Cobrimento	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4
2,0 cm	25,555556	23,571429	22,631579	22,0833333
2,5 cm	27,936508	25,858586	24,888889	24,3274854
3,0 cm	30,882353	28,703704	27,702703	27,1276596
3,5 cm	34,632035	32,345013	31,311155	30,7219662
4,0 cm	39,583333	37,179487	36,111111	35,5072464
4,5 cm	46,451613	43,921569	42,816901	42,1978022
5,0 cm	56,666667	54	52,857143	52,2222222
5,5 cm	-	-	-	-
6,0 cm	-	-	-	-
6,5 cm	-	-	-	-

Fonte: O Autor (2019)

O fator de massividade foi um ponto importante ao longo das análises, pois a variação dos seus valores foi bastante significativa, chegando a dobrar o seu valor à medida que o cobrimento das vigas aumentava ao mesmo tempo em que a área da seção de concreto diminuía (Tabela 2).

Para as vigas maiores os valores do fator de massividade foram bem menores (Tabela 3), justificados pela área da seção aumentada para cada aumento de dimensão. Outra observação é que à medida que as dimensões das vigas aumentaram, o fator de massividade variou pouco. A variação do fator de massividade para as vigas 21, 22, 23 e 24, por exemplo, variam em uma unidade, enquanto para as vigas menores os valores variam em trinta unidades.



Tabela 3: Fator de massividade das vigas 21- 24 e seus cobrimentos relacionados.

Fator de massividade b = 50 cm				
Cobrimento	Viga 21	Viga 22	Viga 23	Viga 24
2,0 cm	6,071964	5,818414	5,629877	5,48419
2,5 cm	6,183575	5,925926	5,734767	5,587302
3,0 cm	6,299841	6,037992	5,844156	5,69488
3,5 cm	6,421074	6,154922	5,958352	5,807232
4,0 cm	6,547619	6,277056	6,077694	5,924695
4,5 cm	6,679851	6,404766	6,202552	6,047639
5,0 cm	6,818182	6,538462	6,333333	6,176471
5,5 cm	6,963068	6,678593	6,470487	6,311637
6,0 cm	7,11501	6,825658	6,614509	6,453634
6,5 cm	7,274564	6,980209	6,76595	6,60301

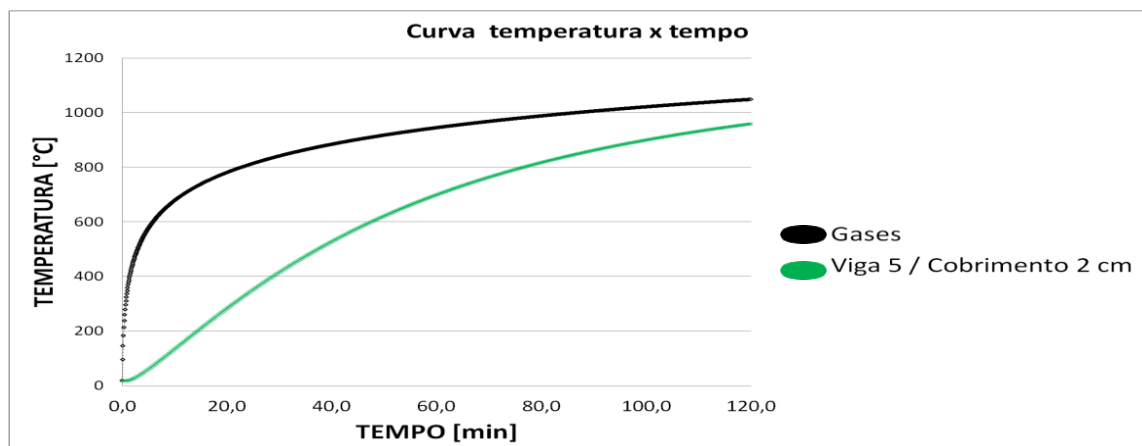
Fonte: O Autor (2019)

Algumas vigas menores não puderam ser analisadas em todas as variações de cobrimento (Tabela 2) por que eram limitadas geometricamente. As vigas de 14 cm, por exemplo, só tiveram seu cobrimento analisado até 5 cm, mais que isso impossibilitaria o posicionamento do aço internamente. Isto quer dizer que uma vez que o cobrimento aumenta, a diminuição da largura da base da seção interna da viga é limitada para dimensionamento.

#### 4.2. Curvas de variação temperatura x tempo

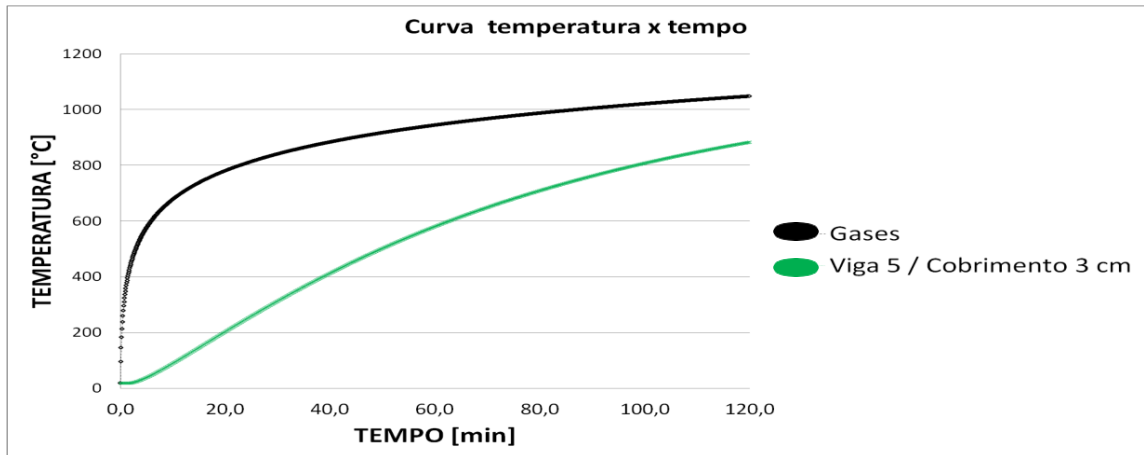
Aplicado a equação de variação de temperatura com o tempo, pode ser plotado a curva que define essa variação para cada uma das vigas, e para cobrimentos diferentes de uma mesma viga. A seguir, nas Figuras de 7 a 11, está exposta uma sequência dessas curvas para a Viga 5 com cobrimentos diferentes, junto também à curva padronizada de temperaturas dos gases:

Figura 7: Curva da variação de temperatura da Viga 5, cobrimento 2 cm.



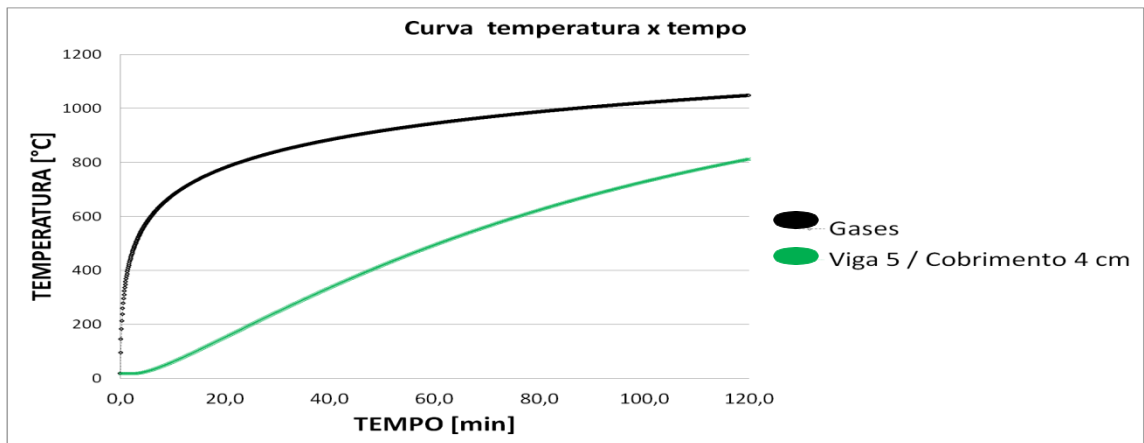
Fonte: O Autor (2019)

Figura 8: Curva da variação de temperatura da Viga 5, cobertura 3 cm.



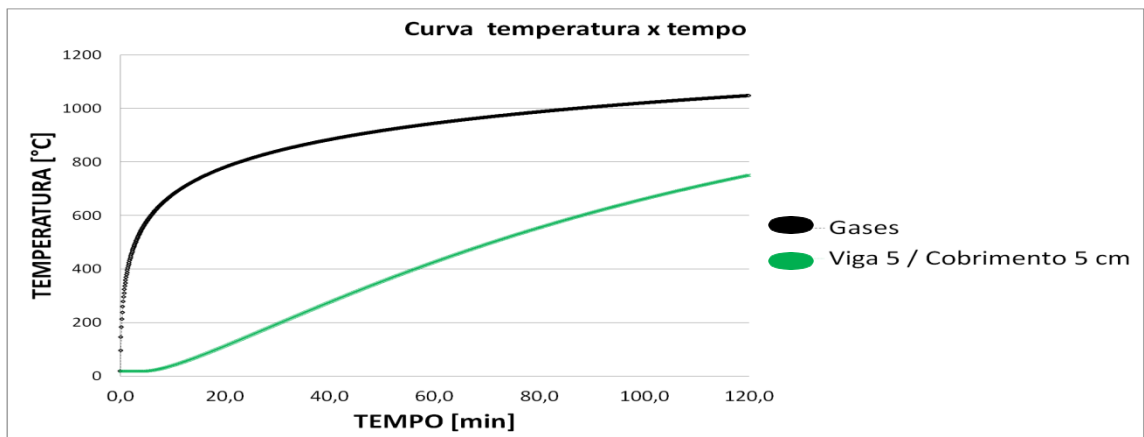
Fonte: O Autor (2019)

Figura 9: Curva da variação de temperatura da Viga 5, cobertura 4 cm.



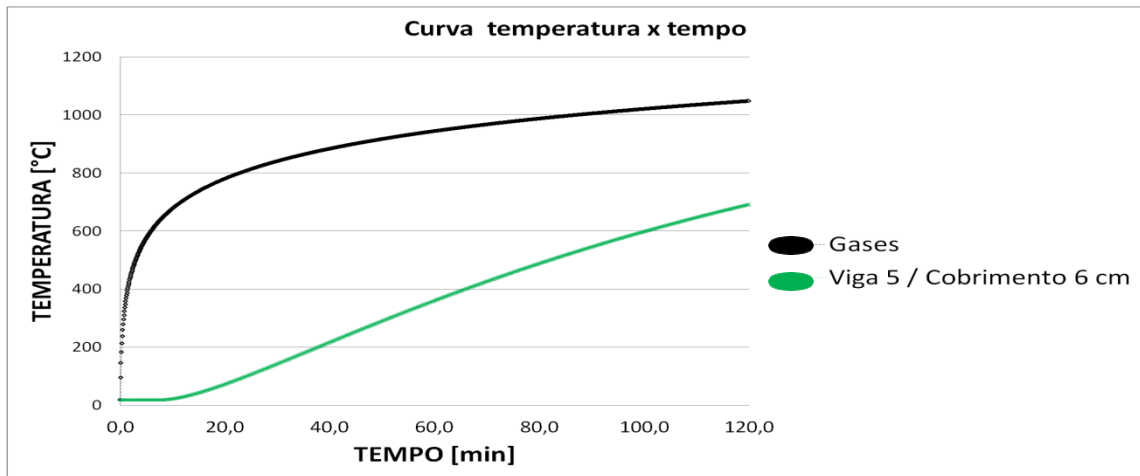
Fonte: O Autor (2019)

Figura 10: Curva da variação de temperatura da Viga 5, cobertura 5 cm.



Fonte: O Autor (2019)

Figura 11: Curva da variação de temperatura da Viga 5, cobrimento 6 cm.



Fonte: O Autor (2019)

Um ponto importante observado da Figura 7 à Figura 11 é que os valores da curva de variação de temperatura diminuem à medida que se aumenta o cobrimento, como era de se esperar. Isto significa que a temperatura do elemento estrutural, neste caso a Viga 5, é menor, se tivermos um cobrimento maior, ou seja, uma maior proteção térmica. Esta temperatura menor é expressa pelo afastamento da curva de temperaturas da Viga 5 da curva de temperaturas dos gases.

Outra observação diz respeito ao início do aumento de temperatura no elemento, onde o tempo para a seção interna da Viga 5 começar a aquecer, é mais curto para um cobrimento de 2 cm, e maior para um cobrimento de 6 cm. Portanto, o calor gerado pelos gases quentes demora mais tempo para atingir a face interna do elemento e começar a alterar sua temperatura.

Vale ressaltar que para todas as vigas analisadas, os comportamentos desta variação de temperatura foram semelhantes. Dependendo sempre da espessura do cobrimento.

Com a curva de temperaturas foi possível obter os valores de temperaturas dos elementos para o TRRF específico desejado (Tabela 4).

Tabela 4: Resultados de temperaturas para vigas de 14 cm e 16 cm.

Temperatura °C b = 14 cm					Temperatura °C b = 16 cm						
TRRF	Cobrimento	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4	TRRF	Cobrimento	Viga 5	Viga 6	Viga 7	Viga 8
30 min	2,0	449,98	431,17	421,72	416,03	30 min	2,0	417,49	395,94	385,09	378,56
	2,5	391,44	375,57	367,76	363,11		2,5	359,48	341,15	332,11	326,73
	3,0	345,71	332,83	326,6	322,92		3,0	314,72	299,52	292,14	287,79
	3,5	308,33	298,33	293,57	290,78		3,5	278,66	266,37	260,5	257,06
	4,0	276,13	268,88	265,47	263,49		4,0	248,34	238,77	234,26	231,63
	4,5	246,36	241,74	239,59	238,34		4,5	221,64	214,63	211,35	209,46
	5,0	215,8	213,7	212,7	212,12		5,0	196,81	192,21	190,07	188,83
	5,5	-	-	-	-		5,5	171,96	169,65	168,56	167,92
	6,0	-	-	-	-		6,0	144,47	144,31	144,16	144,06
	6,5	-	-	-	-		6,5	-	-	-	-
60 min	2,0	734,89	715,59	705,5	699,31	60 min	2,0	700,9	676,63	663,89	656,05
	2,5	675,68	656,72	647,1	641,28		2,5	636,69	612,89	600,77	593,42
	3,0	624,8	607,52	598,97	593,87		3,0	582,33	560,37	549,44	542,91
	3,5	581,06	566,23	559,05	554,82		3,5	536,12	516,67	507,21	501,61
	4,0	542,78	530,83	525,17	521,86		4,0	496,21	479,66	471,76	467,14
	4,5	507,88	499,09	495	492,63		4,5	460,89	447,46	441,16	437,51
	5,0	473,28	467,84	465,34	463,9		5,0	428,44	418,27	413,57	410,87
	5,5	-	-	-	-		5,5	396,76	389,95	386,84	385,06
	6,0	-	-	-	-		6,0	362,45	359,08	357,53	356,64
	6,5	-	-	-	-		6,5	-	-	-	-
90 min	2,0	888,88	874,82	867,21	862,44	90 min	2,0	863,67	844,45	833,96	827,37
	2,5	844,65	828,98	820,8	815,79		2,5	811,79	790,53	779,35	772,47
	3,0	802,82	787,19	779,29	774,52		3,0	763,57	742,17	731,26	724,65
	3,5	764,6	750,21	743,12	738,91		3,5	719,97	699,73	689,67	683,67
	4,0	729,96	717,66	711,75	708,28		4,0	680,81	662,6	653,77	648,56
	4,5	698,03	688,41	683,9	681,28		4,5	645,42	629,85	622,47	618,16
	5,0	666,72	660,22	657,23	655,51		5,0	612,73	600,24	594,45	591,1
	5,5	-	-	-	-		5,5	581,1	572,04	567,91	565,55
	6,0	-	-	-	-		6,0	547,48	542,14	539,73	538,36
	6,5	-	-	-	-		6,5	-	-	-	-

Fonte: O Autor (2019)

Na Tabela 4 estão expostos os valores encontrados para as temperaturas dos elementos de acordo com suas condições de contorno como TRRF, cobrimento e dimensões da viga.

Com esses dados de temperaturas foram feitas comparações. Primeiro foi comparado todas as temperaturas encontradas das vigas de mesmas larguras, por exemplo, as temperaturas das vigas de 14 cm (Vigas de 1 a 4) foram comparadas para análise da influência da altura na temperatura do elemento. Posteriormente foram comparadas as temperaturas do conjunto de vigas de 16 cm, 19 cm, e assim por diante até percorrer todas as seis larguras analisadas.

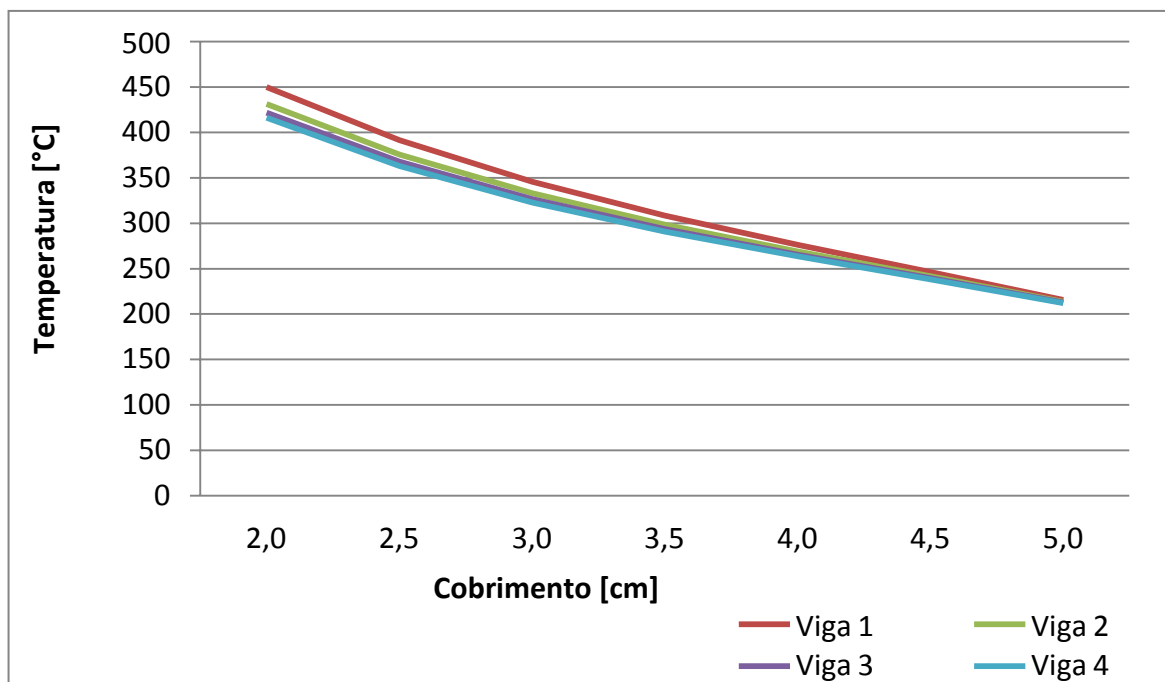
Segundo foram comparadas as temperaturas das vigas de larguras diferentes para a análise térmica. Como os conjuntos de vigas de mesma largura têm alturas diferentes, foi adotada a menor altura de cada conjunto de vigas para a comparação. A menor altura foi escolhida para tentar melhorar a influência térmica da seção.

Todos os seis conjuntos de vigas de mesma largura foram calculados e seus valores são possíveis de observar nos anexos.

### 4.3. Curvas de variação de temperatura x cobrimento

As temperaturas finais em cada posição de cobrimento, explanada pelas curvas de variação de temperatura x cobrimento (Figura 12), trazem características importantes das vigas e suas dimensões, assim como avalia o cobrimento e suas variações de temperaturas.

Figura 12: Vigas com 14 cm de largura, para o TRRF 30 min.



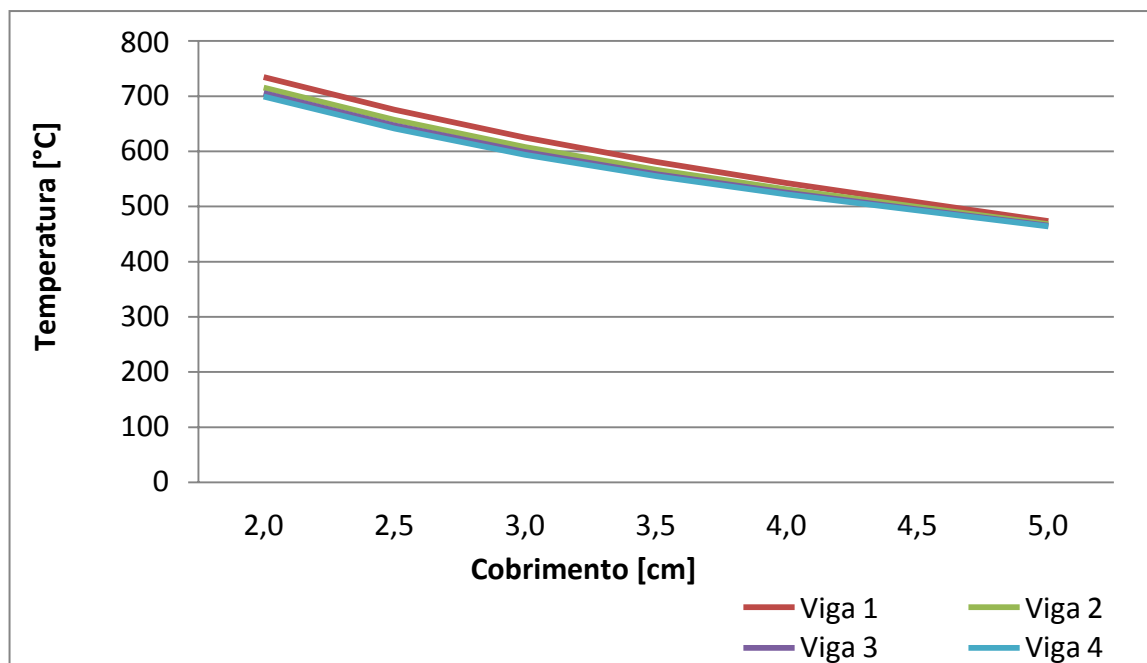
Fonte: O Autor (2019)

Observando a Figura 12 e lembrando que o primeiro conjunto de vigas (viga de 1 à 4) tem largura de 14 cm, é possível identificar os efeitos da variação da altura nas vigas, onde quanto maior for a altura da viga menor será a temperatura da seção. Por exemplo, para 2 cm de cobrimento, a temperatura na Viga 1 (altura igual a 20 cm) é de 450 °C. Já para a Viga 4

(altura igual a 50 cm) a temperatura chega a 416 °C. Mostrando que quando a altura da viga for maior, a temperatura da seção interna (temperatura do elemento) será menor.

Porém, este comportamento não é observado quando o cobrimento é aumentado para 5 cm, onde a temperatura da Viga 1 é de 215 °C e da Viga 4 é de 212 °C. Variando apenas 3 °C aproximadamente, diferente dos quase 34 °C de variação para 2 cm de cobrimento. Isto significa que a altura não influencia tanto para cobrimentos maiores, ou seja, seções internas menores do elemento.

Figura 13: Vigas com 14 cm de largura, para o TRRF 60 min.

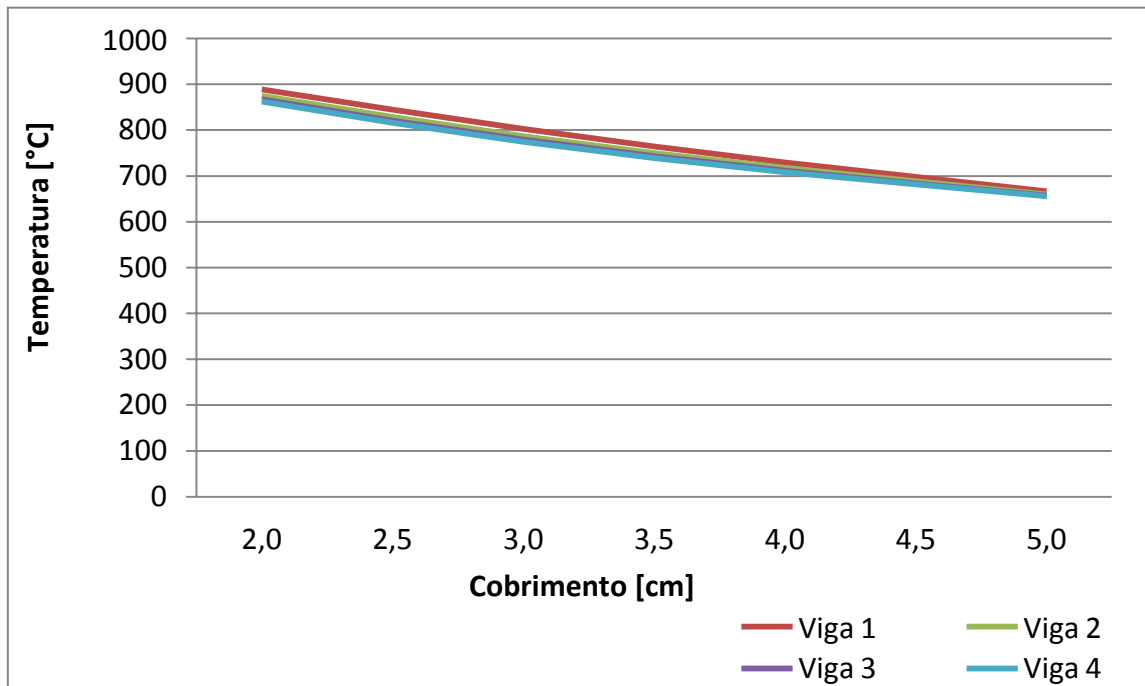


Fonte: O Autor (2019)

Os mesmos comportamentos são possíveis de identificar na Figura 13, porém já é possível perceber que a diferença de temperatura entre as vigas de alturas diferentes diminui. Isso quer dizer que as curvas de temperaturas se aproximaram umas das outras, e ainda que para maiores valores de cobrimentos a diferença foi pequena.

Isso pode ser efeito do TRRF ser maior (60 min), trazendo uma temperatura maior para as vigas pela maior quantidade de calor gerado pelos gases quentes.

Figura 14: Vigas com 14 cm de largura, para o TRRF 90 min.



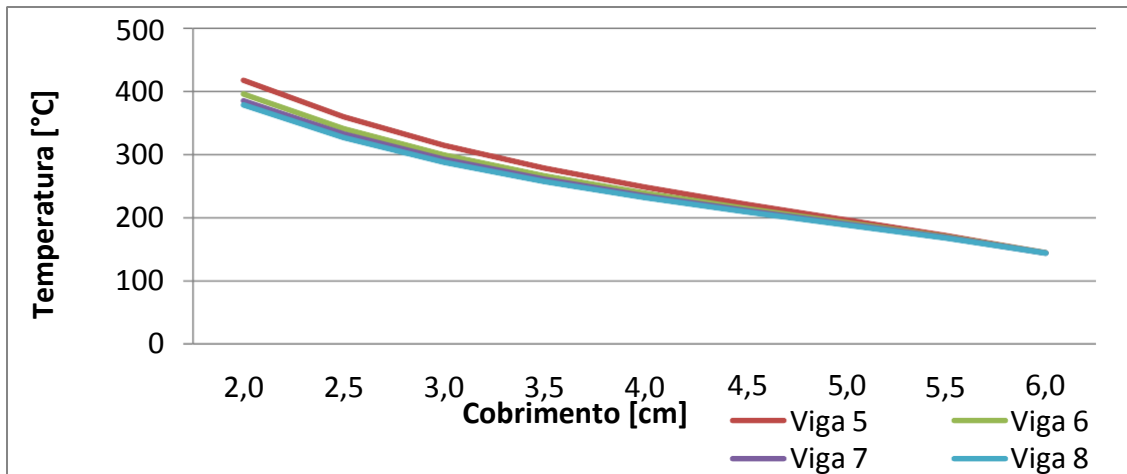
Fonte: O Autor (2019)

Já na Figura 14, com TRRF de 90 minutos, a diferença é ainda menor, quase que inexistente. As curvas das vigas se alinham mais, aproximando mais sua angulação. Também se aproximam, quase que se sobrepondo, compartilhando de temperaturas mais próximas e deixando a diferença de altura em segundo plano.

A evolução da temperatura ao longo das Figuras 12, 13 e 14 também é observável, já que os tempos requeridos de resistência ao fogo mudam. Aonde, para o TRRF de 30 minutos a temperatura máxima das vigas de 14 cm chega a 450 °C, enquanto para o TRRF de 90 minutos as vigas atingem uma temperatura de 888 °C.

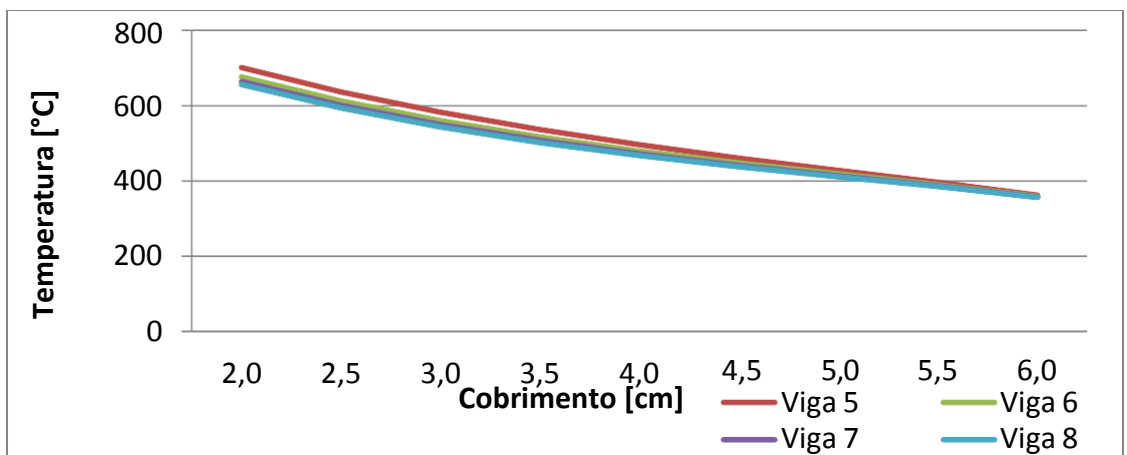
As curvas para as vigas de 16 cm e 19 cm também compartilham dessas observações levantadas. As temperaturas das vigas de 16 cm são expostas nas Figuras 15, 16 e 17, que se seguem:

Figura 15: Vigas com 16 cm de largura, para o TRRF 30 min.



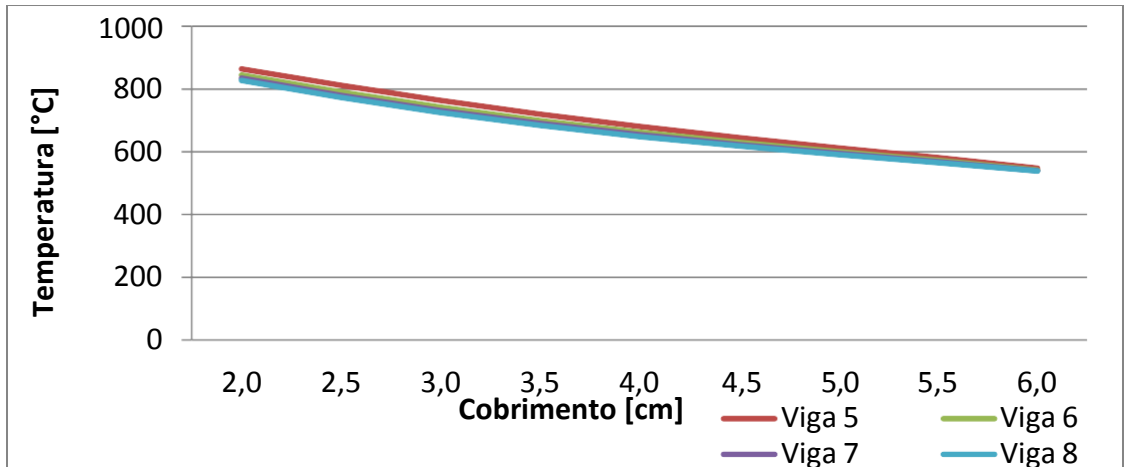
Fonte: O Autor (2019)

Figura 16: Vigas com 16 cm de largura, para o TRRF 60 min.



Fonte: O Autor (2019)

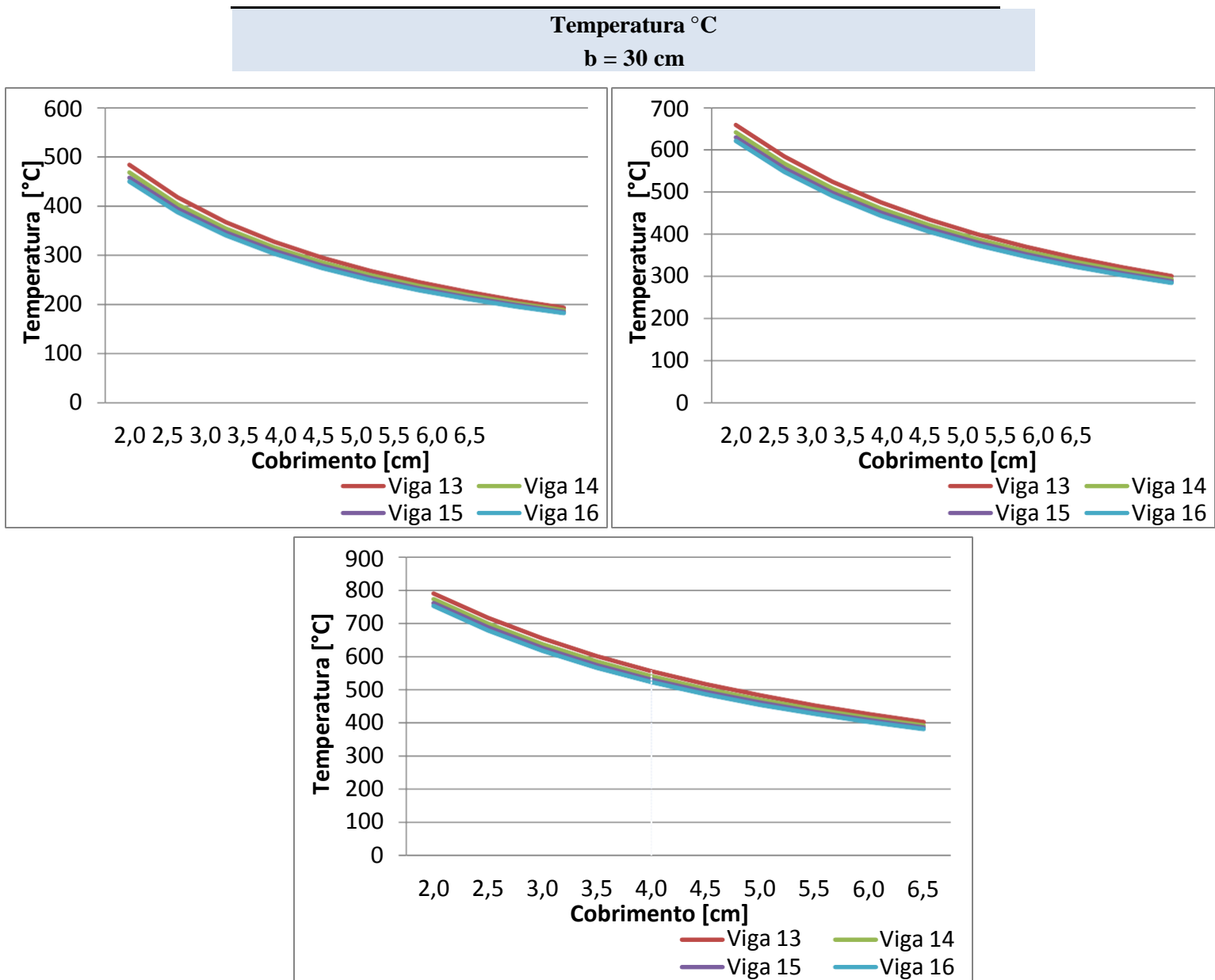
Figura 17: Vigas com 16 cm de largura, para o TRRF 90 min.



Fonte: O Autor (2019)



Figura 18: Vigas com 30 cm de largura, para o TRRF 60, 90 e 120 min.



Fonte: O Autor (2019)

As vigas maiores, ou seja, vigas de 30 cm, 40 cm e 50 cm de largura, também têm suas temperaturas diminuídas pela altura e pelo cobrimento, e mantém o padrão das curvas das vigas menores. Entretanto, o decaimento de temperaturas das vigas maiores é mais evidente (Figura 18), em outras palavras, o ângulo de inclinação das curvas temperatura x cobrimento é maior. Isso quer dizer que a variação de temperatura em relação aos cobrimentos é maior.

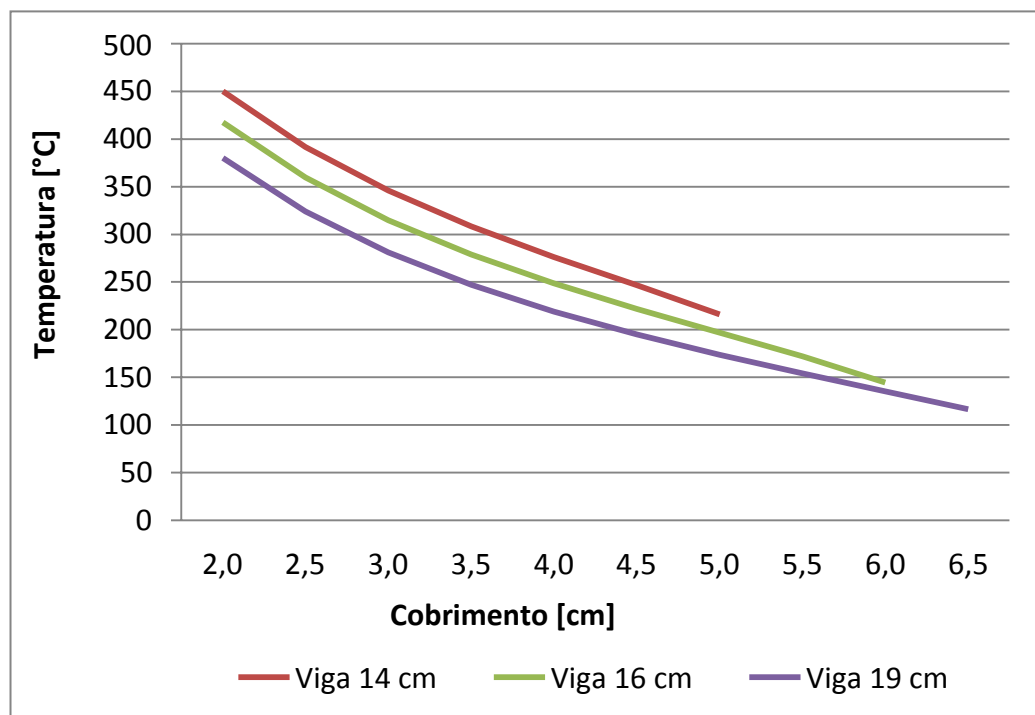
#### 4.4. Análise de vigas com larguras diferentes

Para a comparação das vigas com larguras diferentes, foi escolhida a viga de menor altura para cada conjunto de viga de mesma largura. Isto quer dizer que para o conjunto de viga de 14 cm, a viga 1 foi escolhida por corresponder a menor altura (20 cm). E assim foram utilizadas para a plotagem dos gráficos de temperatura x cobrimento.

Comparando as vigas de larguras diferentes (Figura 19), é possível observar semelhanças de comportamentos entre as curvas. O declínio de temperaturas de acordo com o cobrimento especificado acontece nas vigas da mesma forma, assim como as inclinações das curvas temperaturas x cobrimento se assemelham, mostrando um padrão de decaimento.

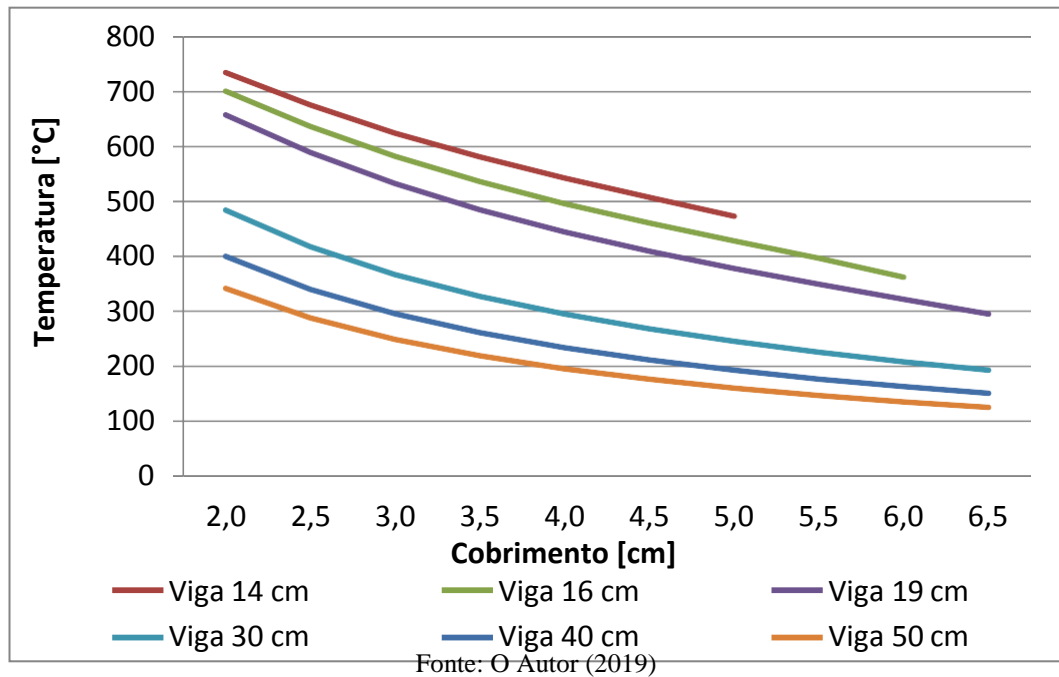
Entretanto, as vigas com maior largura iniciam suas temperaturas alguns graus a menos, para cobrimento de 2 cm, e continuam com temperaturas menores a medida que o cobrimento é aumentado. E assim, se segue uma diferença de temperatura entre as curvas, observada através da distancia entre as curvas.

Figura 19: Comparação entre vigas de larguras 14, 16 e 19 cm, para o TRRF 30 min.



Fonte: O Autor (2019)

Figura 20: Comparação entre todas as vigas de mesma largura, para o TRRF 60 min.



Da Figura 19 a Figura 22 é possível observar o distanciamento das curvas. Este distanciamento está relacionado às dimensões das vigas, onde fica evidente que as viga maiores correspondem às vigas com menores temperaturas nas seções transversais.

Figura 21: Comparação entre todas as vigas, para o TRRF 90 min.

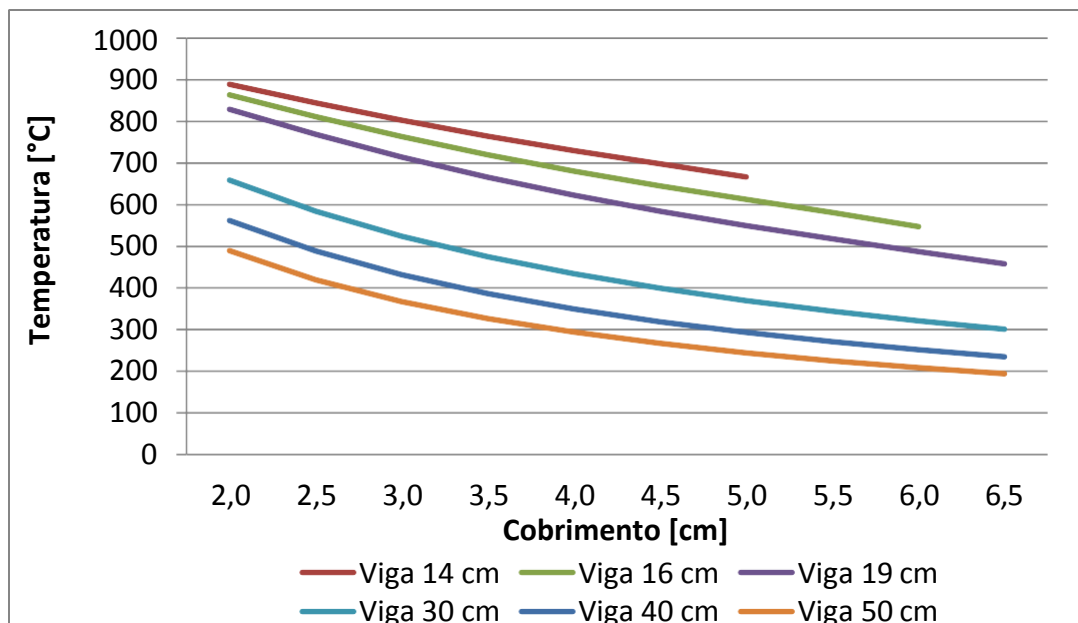
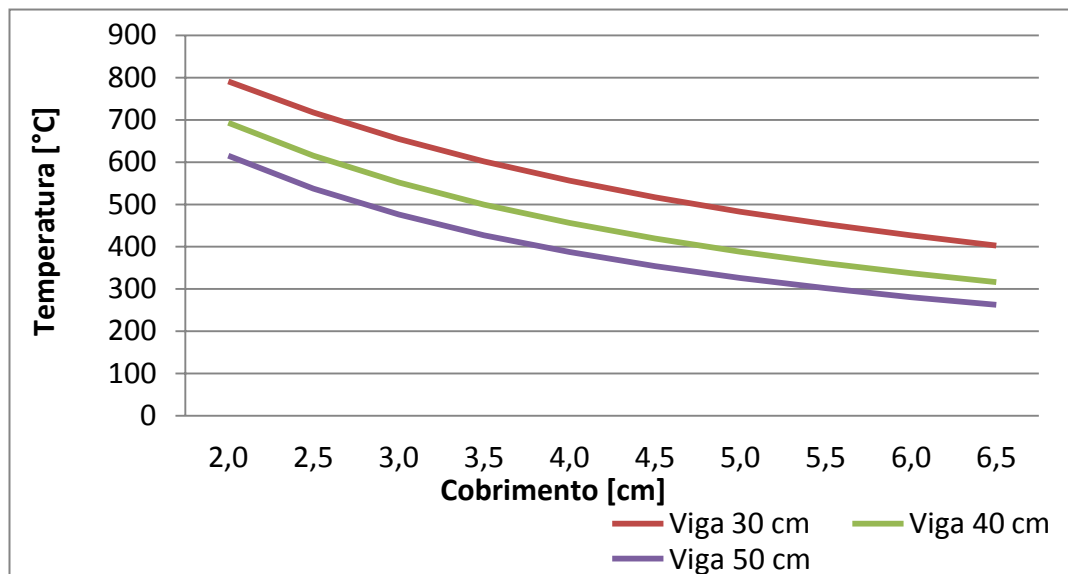


Figura 22: Comparação entre as vigas de 30, 40 e 50 cm, para o TRRF 120 min.



Fonte: O Autor (2019)

Esse afastamento entre as curvas das vigas de larguras diferentes também sofre influencia do fator de massividade. Visto que, o perímetro exposto ao fogo considerado é o perímetro interno do material de proteção, e com isso, bastante reduzido em comparação ao perímetro externo.

#### 4.5. Análises com os Ábacos

Por fim, se fez possível comparar alguns dos resultados obtidos com os Ábacos da norma europeia EN 1992-1-2: Eurocode 2. As vigas de 16 cm, 30 cm, e 50 cm, analisadas neste trabalho, também se encontram analisadas pela norma europeia, para TRRF diferentes, podendo trazer outras perspectivas para o comportamento térmico nas seções de concreto.

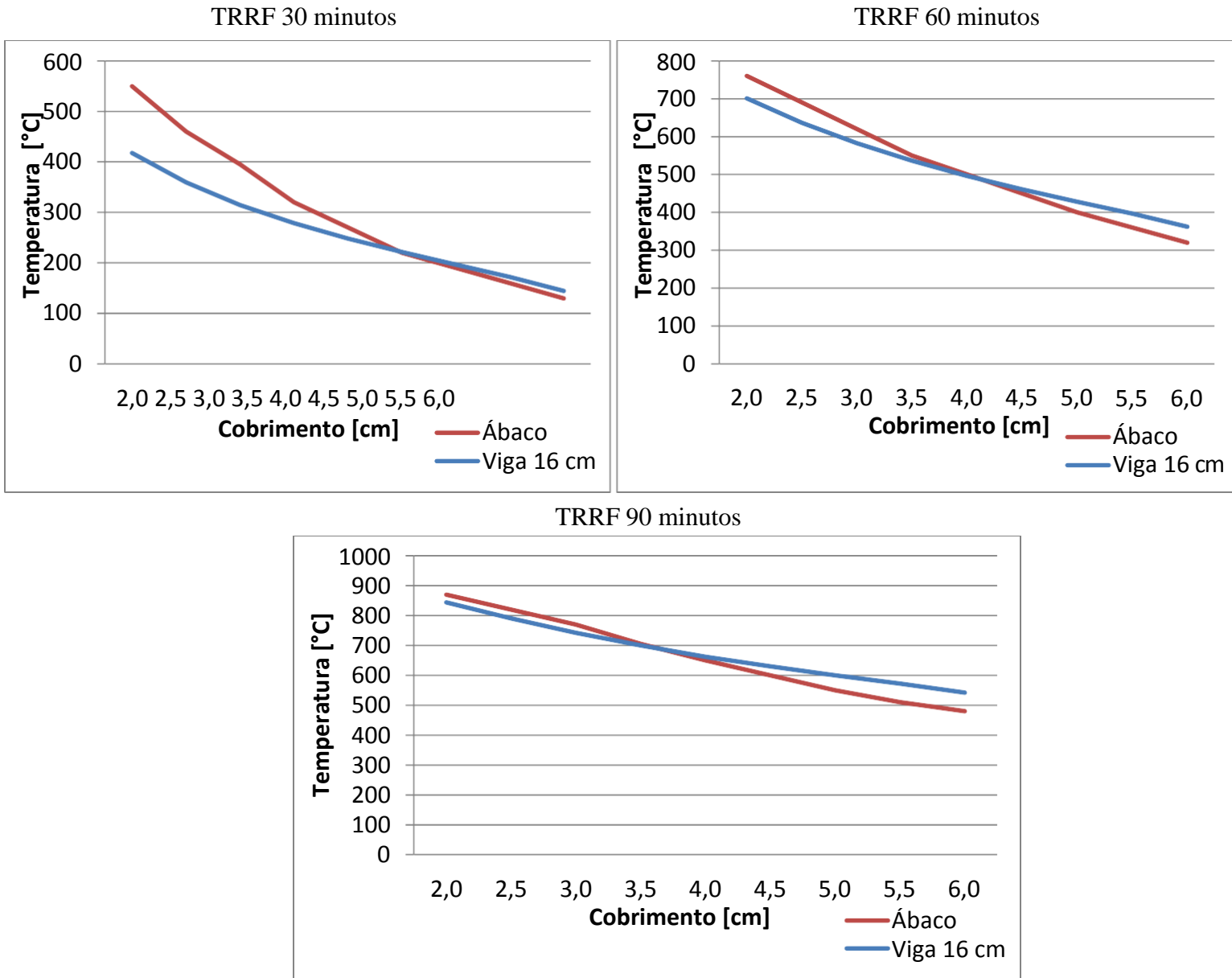
Então buscando os ábacos e calculando seus valores para os TRRF analisados, e também para cada cobrimento, foi possível obter as temperaturas à serem comparadas com as temperaturas das vigas encontradas utilizando o método (Tabela 5). Com esses valores, foram plotados os gráficos de temperatura x cobrimento para discussão.

Tabela 5: Temperatura variando com o cobrimento para TRRF's diferentes.

		Temperatura °C			
		Abacos			
	Cobrimento	TRRF	30	60	90
Viga 160x300 mm	2,0		550	760	870
	2,5		460	690	820
	3,0		395	620	770
	3,5		320	550	705
	4,0		270	500	650
	4,5		220	450	600
	5,0		190	400	550
	5,5		160	360	510
	6,0		130	320	480
	6,5		-	-	-

Fonte: O Autor (2019)

Figura 23: Comparação entre Ábaco e Viga de 16 cm, para o TRRF 30, 60 e 90 min.



Fonte: O Autor (2019)

Comparando as curvas da viga de 16 cm com o ábaco correspondente, algumas observações são evidenciadas (Figura 23). Para o TRRF 30 minutos, as duas curvas aparentam compartilhar de mesma inclinação. Porém de 2 cm a 4 cm de cobrimento os valores da curva da viga estão bastante abaixo dos valores indicados por norma. Trazendo uma leve inconsistência nos resultados obtidos. Esta diferença pode ser justificada pela consideração do fator de massividade na seção interna do elemento de concreto.

Já para o TRRF 60 minutos, as curvas se aproximam ainda mais, e a diferença das temperaturas encontradas na viga e no ábaco se reduzem a 50 °C. No entanto, considerando a imprecisão na análise do ábaco, esta diferença de 50 °C já se encaminha para ser validada.

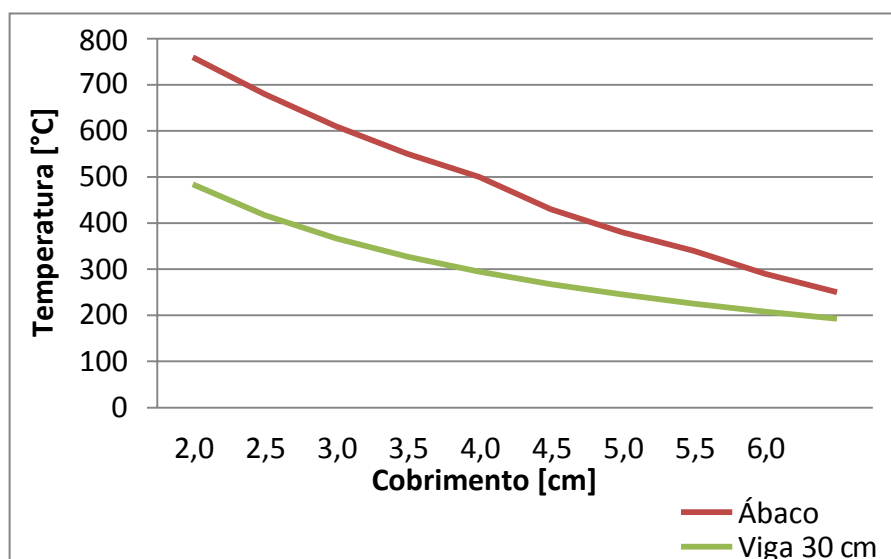
No TRRF 90 minutos, a Viga de 16 cm sobrepõe a curva do ábaco quase que completamente, mostrando uma semelhança entre os valores encontrados no trabalho e na norma europeia.

A evolução do TRRF de 30 minutos para 90 minutos leva a curva de temperaturas da viga analisada a se encontrar com a curva de temperaturas do ábaco. Compartilhando de valores bastante próximos para temperaturas maiores.

Estes fatos podem ser justificados em partes, pois com uma maior quantidade de calor produzida, e elevando as temperaturas do ambiente e da proteção térmica, a seção interna do elemento de concreto também se aquece, vencendo assim a área da seção interna.

Área esta que é causa da diminuição de temperatura, como já foi visto.

Figura 24: Comparação entre Ábaco e Viga de 30 cm, para o TRRF 60 min.



Fonte: O Autor (2019)

Figura 25: Comparação entre Ábaco e Viga de 30 cm, para o TRRF 90 min.

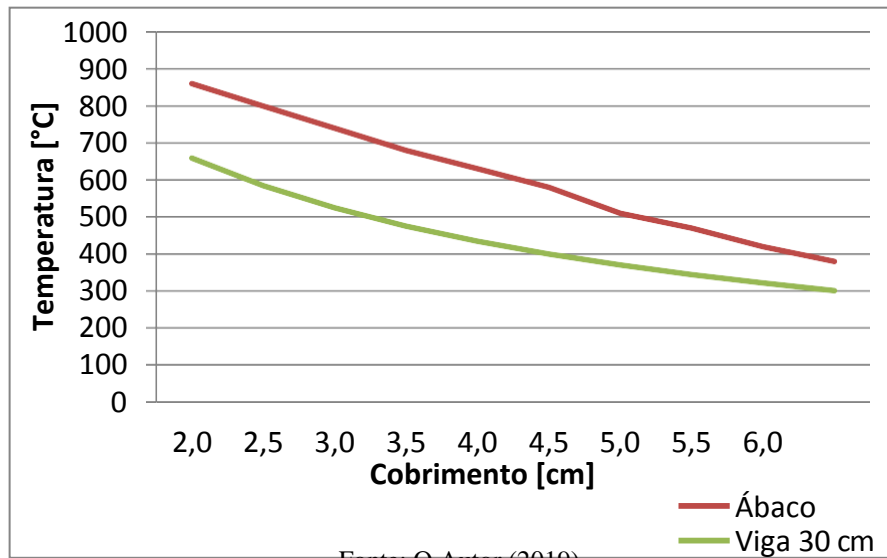
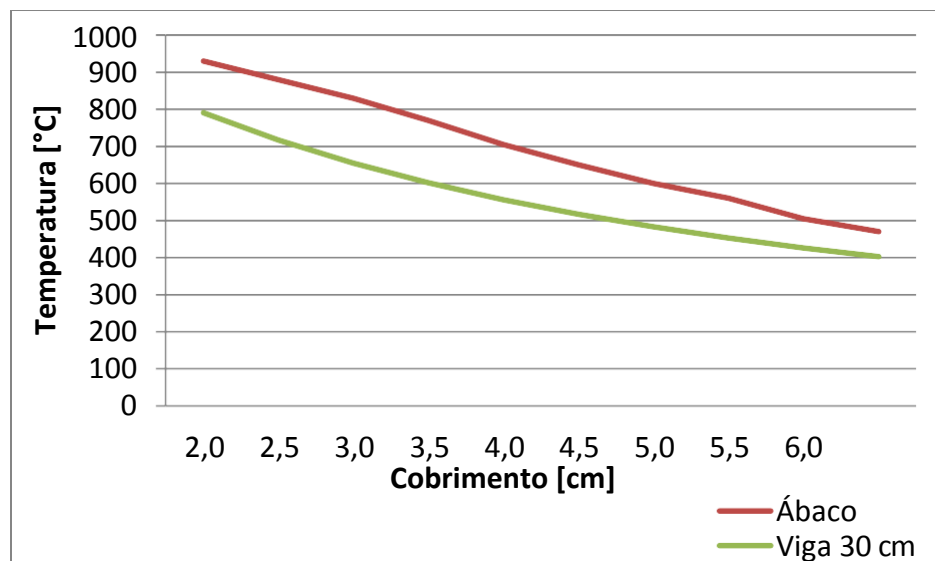


Figura 26: Comparação entre Ábaco e Viga de 30 cm, para o TRRF 120 min.



Nas Figuras 24, 25 e 26, novamente é mostrado uma relação positiva com o aumento da temperatura através do TRRF. Onde a curva de temperaturas da viga se aproxima da curva de temperaturas do ábaco. Todavia percebe-se que o afastamento, ou diferença de temperaturas, é bem maior entre as curvas, mesmo considerando a imprecisão do ábaco. Isso pode ser justificado pelo fato da área da seção da viga de 30 cm ser bem maior, que da viga de 16 cm, por exemplo, exigindo uma maior quantidade de calor para elevar a temperatura.

Figura 27: Comparação entre Ábaco e Viga de 50 cm, para o TRRF 90 min.

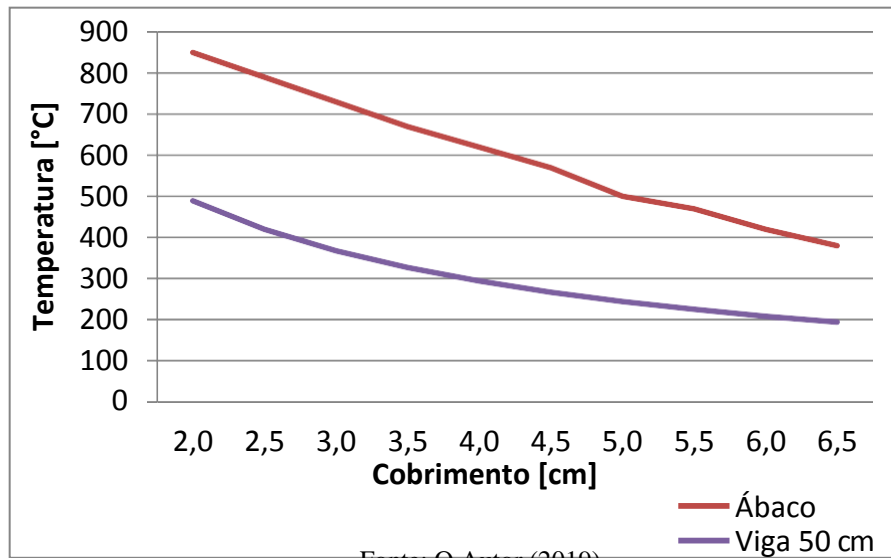
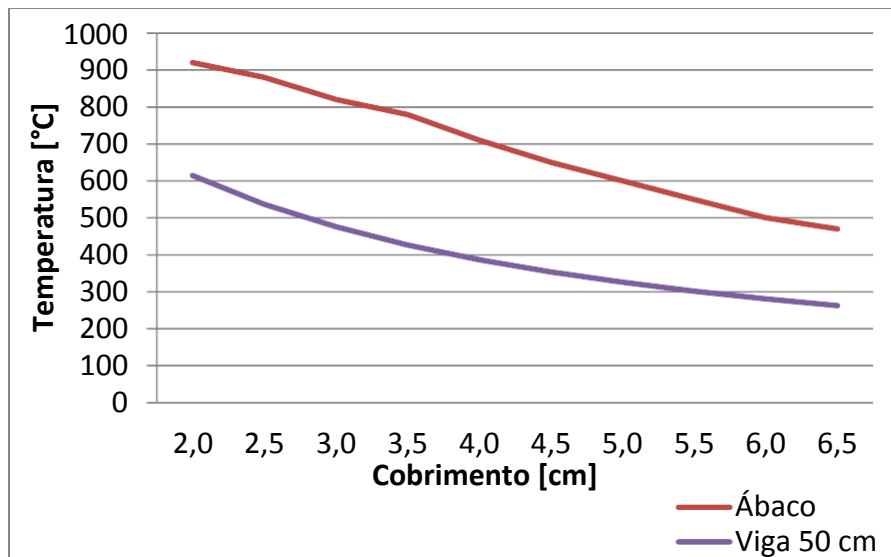


Figura 28: Comparação entre Ábaco e Viga de 50 cm, para o TRRF 120 min.



Essa diferença de temperatura entre as curvas da viga e do ábaco correspondente aumenta ainda mais à medida que as dimensões da viga aumentam (Figuras 27 e 28). Confirmando que quanto maior a seção de concreto, menor será a temperatura, pois exigirá mais calor.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. Conclusões

Com os modelos matemáticos de incêndio disponíveis, foi apresentada uma adaptação do método simplificado de análise térmica de elementos metálicos, para elementos de concreto.

É possível concluir que o método elaborado se comporta de maneira positiva para vigas de dimensões menores, isso quer dizer que as temperaturas encontradas pelo método estão bastante próximas das temperaturas encontradas nos ábacos das vigas correspondentes. Temperaturas estas que são importantes para a utilização no momento do projeto ou da verificação estrutural em situação de incêndio.

Porém, para dimensões cada vez maiores do elemento de concreto, o método adaptado se comporta de maneira negativa, onde as temperaturas calculadas são menores do que as temperaturas encontradas na norma europeia, pois o calor se dispersa mais no elemento robusto e exige uma quantidade maior de calor para aquecê-los. Talvez esse fato possa ser corrigido com uma melhor análise do fator de massividade na equação, visto que para o perfil metálico este é um parâmetro constante na equação de elevação de temperatura.

Por conta de suas propriedades individuais mecânicas e térmicas, ao longo da pesquisa também puderam ser identificadas algumas diferenças comportamentais entre o concreto e o aço. Uma diferença foi à distribuição não uniforme de temperatura para o concreto, onde no aço a temperatura consegue se distribuir por todo o elemento. Outro ponto é o concreto ser um bom material de proteção térmica, até mesmo para o aço em estruturas mistas. E ainda que o tamanho do elemento de aço não interfere significativamente na análise térmica, onde para o concreto foi possível identificar que interfere.

Em relação ao comportamento térmico do elemento de concreto, é possível afirmar que considerar uma única temperatura na seção interna é uma decisão muito conservadora, como já era esperado. Pois, o elemento de concreto além de mais espesso, também possui propriedades favoráveis à redução de temperatura como a baixa condutividade térmica, diferentemente do elemento metálico que tem um alto valor de condutividade.

Também foi compreendido que o modelo padrão de incêndio é um modelo bastante conservador, podendo trazer resultados a favor da segurança para as análises térmicas. Porém, para resultados mais precisos pode-se optar por outros modelos de incêndio, como o natural, o localizado etc.

## **5.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Como recomendação para trabalhos futuros sugere-se:

- (1) Utilização de fatores de massividade constantes para uma melhor aproximação com os elementos metálicos;
  - (2) A investigação de técnicas de adaptação mais eficientes para proporcionar maior eficiência nos resultados;
  - (3) A comparação com mais ábacos da literatura técnica para identificar mais semelhanças e divergências;
  - (4) A comparação com outras normas internacionais;
-

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323 Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio**. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432 Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento**. 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200 Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. 2014.
- BAILEY, C. G. Effective lengths of concrete-filled steel square hollow sections in fire. **Proceedings of the Institution of Structural Engineers. Structures and Buildings**. London, v. 140, 2000.
- BARBOSA, M. R. **Princípios fundamentais da transferência de calor**. 2004. 48f. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.
- BASTOS, P. S. **Fundamentos do concreto armado**. Notas de aula, fundamentos do concreto armado. UNESP-Campus Bauru-SP. 2006.
- BRENTANO, Telmo. **Instalações hidráulicas de combate a incêndios nas edificações**. 4. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2011.
- CALDAS, R. B. **Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio**. Tese de pós-graduação. Universidade de Minas Gerais. 2008.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO, J. R.. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. Editora da Universidade Federal de São Carlos, 4ed. 2014.
- COELHO, A. L. **Incêndios em edifícios**. Editora Orion, primeira edição – outubro de 2010.
- COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto em situação de incêndio**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. 2008
- COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Considerações sobre a segurança das estruturas de concreto em situação de incêndio**. NATAU, 2004.
- COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Métodos tabulares apresentados em normas internacionais**. V Simpósio Epus sobre estruturas de concreto. 2003.
-

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Diretrizes da nova norma brasileira NBR 15200:2004 para projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: uma análise comparativa com a NBR 6118:2003.** Revista Ibracon de Estruturas, São Paulo, v.2, n.1, p.1-30, 2006a.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Efeito da restrição às deformações térmicas em elementos de concreto sob flexão simples em situação de incêndio.** In: Congresso Brasileiro de Concreto 2006. São Paulo: IBRACON, 2006b, 1CD-ROM.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Estruturas de concreto armado em situação de incêndio.** In: Jornadas sul-americanas de engenharia estrutura, 30., 2002, Brasília. Anais... Brasília: FINATEC/UnB, 2002. 1 CD-ROM.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Métodos simplificados para o dimensionamento de estruturas de concreto sujeitas à flexão simples, em situação de incêndio.** In: 45º Congresso Brasileiro de Concreto. Anais. São Paulo: IBRACON, 2005b. p. III. 133-III. 153. 1 CD-ROM.

COSTA, C. N.; RITA, I. A. et al. **Princípios do “método dos 500°C” aplicados no dimensionamento de pilares de concreto armado em situação de incêndio, com base nas prescrições da NBR 6118:2003 para projeto à temperatura ambiente.** IBRACON – 46º Congresso Brasileiro de Concreto. 2004.

EUROCODE 1: **Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire.** 2002.

EUROCODE 2: **Design of concrete structures - Part 1-2: General rules and rules for buildings.** 2004.

FRANSSEN, J. M. Fire tests and calculation methods for circular concrete columns. **Fire Technology**, Norwell, v. 39, n. 1, 2003.

GOMES, T. **Projeto de prevenção e combate à incêndio.** Monografia. Universidade Federal de Santa Maria. 2014.

INÁCIO, P. J. **Evolução da temperatura ambiente em construções sujeitas ao fogo.** Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2011.

KREITH, F.; BOHN, M. S.; **Princípios de Transferência de Calor.** 1977, Editora Edgard Blucher, São Paulo p1 a 21.

METHA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** Pini, 1994. P573.

RICARDO, A. S. **Análise da confiabilidade estrutural de elementos de aço em situação de incêndio.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Santa Catarina. 2015

SEITO, A. I. et al. **A Segurança contra Incêndio no Brasil.** São Paulo: Projeto Editora. 2008. P496.

---

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Editora Edgard Blücher. 2012.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Editora Edgard Blücher. 2012.

SOUZA, D. A.; SILVA, G. P. **Estruturas de concreto em situação de incêndio**. Monografia. Universidade Federal de Goiás. 2015.

WORLD FIRE STATISTICS **Information bulletin of the World Fire Statistics Centre**. Geneva: The Geneva Association, n. 19, Oct. 2003.

---

## ANEXO A

Resultado encontrado para as temperaturas das seções internas das vigas de concreto analisadas.

Figura 29: Temperaturas das vigas de 14 cm e 16 cm.

Temperatura °C b = 14 cm						Temperatura °C b = 16 cm					
TRRF	Cobrimento	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4	TRRF	Cobrimento	Viga 5	Viga 6	Viga 7	Viga 8
30 min	2,0	449,98	431,17	421,72	416,03	30 min	2,0	417,49	395,94	385,09	378,56
	2,5	391,44	375,57	367,76	363,11		2,5	359,48	341,15	332,11	326,73
	3,0	345,71	332,83	326,6	322,92		3,0	314,72	299,52	292,14	287,79
	3,5	308,33	298,33	293,57	290,78		3,5	278,66	266,37	260,5	257,06
	4,0	276,13	268,88	265,47	263,49		4,0	248,34	238,77	234,26	231,63
	4,5	246,36	241,74	239,59	238,34		4,5	221,64	214,63	211,35	209,46
	5,0	215,8	213,7	212,7	212,12		5,0	196,81	192,21	190,07	188,83
	5,5	-	-	-	-		5,5	171,96	169,65	168,56	167,92
	6,0	-	-	-	-		6,0	144,47	144,31	144,16	144,06
6,5	-	-	-	-	6,5	-	-	-	-		
60 min	2,0	734,89	715,59	705,5	699,31	60 min	2,0	700,9	676,63	663,89	656,05
	2,5	675,68	656,72	647,1	641,28		2,5	636,69	612,89	600,77	593,42
	3,0	624,8	607,52	598,97	593,87		3,0	582,33	560,37	549,44	542,91
	3,5	581,06	566,23	559,05	554,82		3,5	536,12	516,67	507,21	501,61
	4,0	542,78	530,83	525,17	521,86		4,0	496,21	479,66	471,76	467,14
	4,5	507,88	499,09	495	492,63		4,5	460,89	447,46	441,16	437,51
	5,0	473,28	467,84	465,34	463,9		5,0	428,44	418,27	413,57	410,87
	5,5	-	-	-	-		5,5	396,76	389,95	386,84	385,06
	6,0	-	-	-	-		6,0	362,45	359,08	357,53	356,64
6,5	-	-	-	-	6,5	-	-	-	-		
90 min	2,0	888,88	874,82	867,21	862,44	90 min	2,0	863,67	844,45	833,96	827,37
	2,5	844,65	828,98	820,8	815,79		2,5	811,79	790,53	779,35	772,47
	3,0	802,82	787,19	779,29	774,52		3,0	763,57	742,17	731,26	724,65
	3,5	764,6	750,21	743,12	738,91		3,5	719,97	699,73	689,67	683,67
	4,0	729,96	717,66	711,75	708,28		4,0	680,81	662,6	653,77	648,56
	4,5	698,03	688,41	683,9	681,28		4,5	645,42	629,85	622,47	618,16
	5,0	666,72	660,22	657,23	655,51		5,0	612,73	600,24	594,45	591,1
	5,5	-	-	-	-		5,5	581,1	572,04	567,91	565,55
	6,0	-	-	-	-		6,0	547,48	542,14	539,73	538,36
6,5	-	-	-	-	6,5	-	-	-	-		

Fonte: O Autor (2019)

Figura 30: Temperaturas das vigas de 19 cm e 30 cm.

Temperatura °C b = 19 cm						Temperatura °C b = 30 cm					
TRRF	Cobrimento	Viga 9	Viga 10	Viga 11	Viga 12	TRRF	Cobrimento	Viga 13	Viga 14	Viga 15	Viga 16
30 min	2,0	380,23	355,42	342,91	335,36	60 min	2,0	484,07	468,41	457,77	450,06
	2,5	323,93	302,74	292,26	286,01		2,5	417,71	403,6	394,1	387,27
	3,0	281,1	263,24	254,55	249,41		3,0	367,08	354,51	346,11	340,1
	3,5	247,08	232,21	225,08	220,9		3,5	327,17	316,02	308,61	303,34
	4,0	218,98	206,82	201,07	197,71		4,0	294,81	284,94	278,42	273,8
	4,5	194,95	185,27	180,74	178,12		4,5	267,94	259,22	253,49	249,44
	5,0	173,66	166,29	162,87	160,9		5,0	245,16	237,48	232,46	228,92
	5,5	154,1	148,9	146,49	145,1		5,5	225,49	218,75	214,36	211,28
	6,0	135,38	132,21	130,72	129,86		6,0	208,21	202,34	198,53	195,86
6,5	116,54	115,29	114,64	114,25	6,5	192,79	187,72	184,45	182,16		
60 min	2,0	658,06	627,22	610,95	600,91	90 min	2,0	659,27	641,89	629,88	621,09
	2,5	589,57	559,59	544,24	534,92		2,5	584,71	567,83	556,32	547,97
	3,0	532,76	504,92	491	482,65		3,0	524,53	508,67	497,97	490,26
	3,5	485,14	460,01	447,7	440,4		3,5	475,28	460,63	450,82	443,79
	4,0	444,56	422,39	411,74	405,48		4,0	434,31	420,91	411,99	405,64
	4,5	409,29	390,2	381,18	375,93		4,5	399,68	387,49	379,44	373,72
	5,0	377,91	361,95	354,53	350,25		5,0	369,95	358,93	351,69	346,57
	5,5	349,23	336,43	330,57	327,21		5,5	344,08	334,17	327,69	323,12
	6,0	322,04	312,45	308,1	305,62		6,0	321,25	312,39	306,63	302,58
6,5	294,97	288,62	285,75	284,12	6,5	300,86	293	287,91	284,34		
90 min	2,0	829,07	802,29	787,56	778,27	120 min	2,0	790,34	773,6	761,86	753,18
	2,5	768,82	739,72	724,3	714,77		2,5	717,13	699,69	687,65	678,85
	3,0	714,26	684,99	669,95	660,79		3,0	654,64	637,44	625,7	617,19
	3,5	665,74	637,65	623,58	615,13		3,5	601,5	585,01	573,88	565,85
	4,0	622,71	596,65	583,89	576,32		4,0	556,08	540,55	530,14	522,68
	4,5	584,31	560,83	549,57	542,97		4,5	516,91	502,44	492,82	485,96
	5,0	549,64	529,13	519,49	513,89		5,0	482,8	469,45	460,62	454,35
	5,5	517,77	500,5	492,54	487,97		5,5	452,81	440,56	432,52	426,84
	6,0	487,64	473,87	467,63	464,07		6,0	426,16	415,02	407,74	402,61
6,5	457,93	447,87	443,37	440,82	6,5	402,24	392,18	385,64	381,06		

Fonte: O Autor (2019)

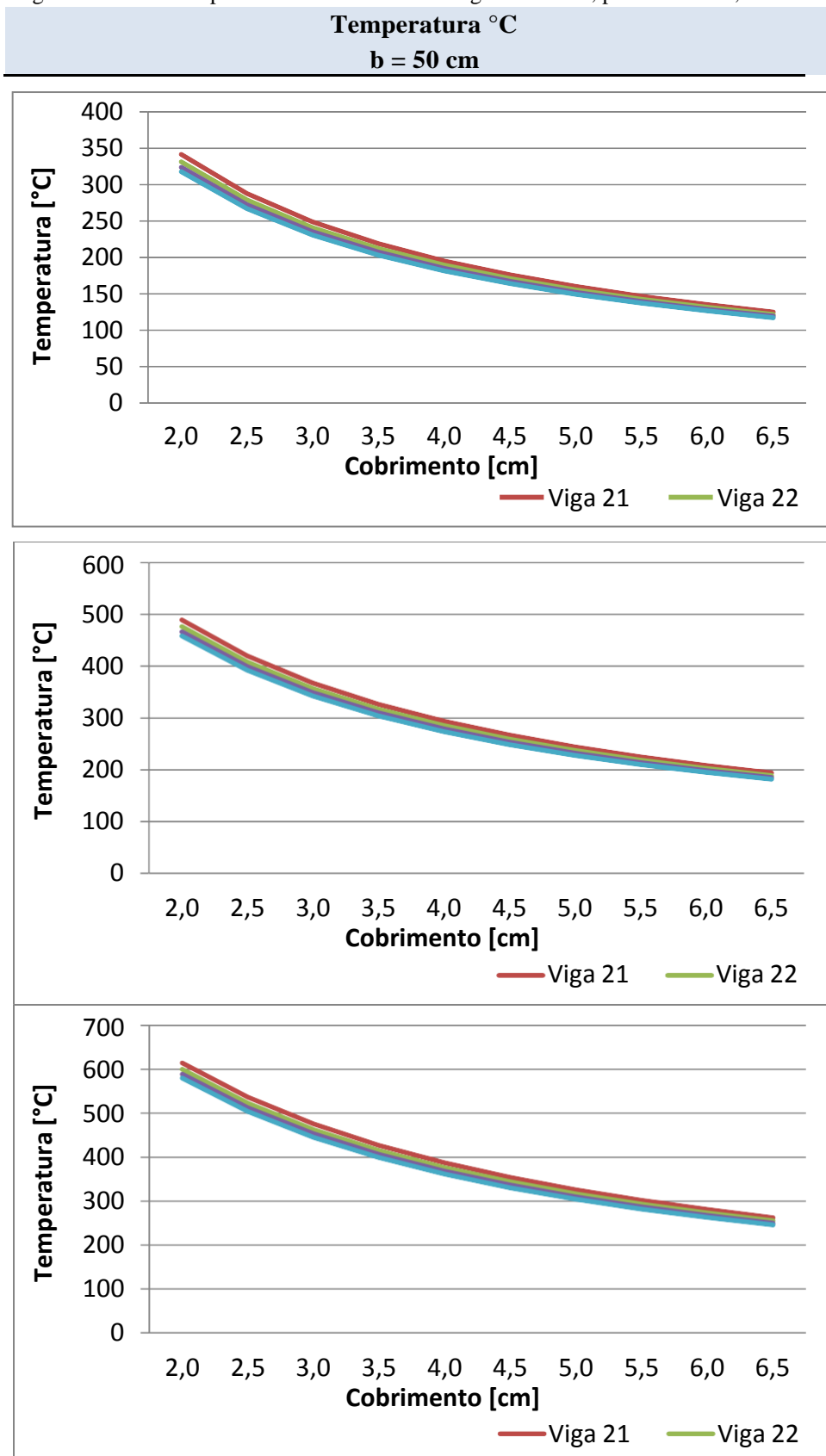
Figura 31: Temperaturas das vigas de 40 cm e 50 cm.

Temperatura °C b = 40 cm						Temperatura °C b = 50 cm					
TRRF	Cobrimento	Viga 17	Viga 18	Viga 19	Viga 20	TRRF	Cobrimento	Viga 21	Viga 22	Viga 23	Viga 24
60 min	2,0	400,14	387,41	378,19	371,2	60 min	2,0	341,63	331,4	323,65	317,57
	2,5	340,09	328,92	320,89	314,82		2,5	287,81	278,99	272,34	267,14
	3,0	295,59	285,78	278,76	273,49		3,0	248,65	240,99	235,23	230,74
	3,5	261,23	252,59	246,43	241,82		3,5	218,81	212,1	207,07	203,16
	<sup>4,0</sup>	233,83	226,19	220,76	216,71		4,0	195,25	189,33	184,91	181,48
	4,5	211,38	204,6	199,8	196,23		4,5	176,11	170,86	166,95	163,92
	5,0	192,58	186,56	182,31	179,15		5,0	160,21	155,53	152,05	149,37
	5,5	176,55	171,19	167,43	164,63		5,5	146,74	142,56	139,46	137,07
	6,0	162,65	157,89	154,55	152,08		6,0	135,14	131,4	128,63	126,5
6,5	150,44	146,21	143,26	141,07	6,5	125,02	121,67	119,2	117,29		
90 min	2,0	562,33	546,84	535,49	526,83	90 min	2,0	489,49	476,33	466,27	458,34
	2,5	488,74	474,33	463,86	455,92		2,5	419,98	408,06	399,02	391,91
	3,0	431,78	418,58	409,06	401,87		3,0	367,58	356,85	348,75	342,41
	3,5	386,51	374,5	365,88	359,4		3,5	326,7	317,05	309,79	304,12
	4,0	349,67	338,76	330,97	325,13		4,0	293,91	285,2	278,67	273,58
	4,5	319,07	309,16	302,12	296,86		4,5	266,96	259,08	253,19	248,62
	5,0	293,19	284,2	277,83	273,08		5,0	244,38	237,24	231,91	227,78
	5,5	270,95	262,8	257,04	252,76		5,5	225,15	218,66	213,83	210,09
	6,0	251,59	244,2	238,99	235,13		6,0	208,52	202,62	198,23	194,85
6,5	234,53	227,83	223,13	219,66	6,5	193,97	188,59	184,61	181,54		
120 min	2,0	693,28	676,98	664,9	655,61	120 min	2,0	614,85	600,21	588,93	579,98
	2,5	614,69	598,64	586,89	577,91		2,5	536,68	522,8	512,19	503,81
	3,0	551,11	535,83	524,73	516,3		3,0	475,58	462,67	452,87	445,17
	3,5	499,04	484,72	474,39	466,58		3,5	426,74	414,83	405,83	398,79
	<sup>4,0</sup>	455,75	442,44	432,89	425,7		4,0	386,86	375,91	367,66	361,23
	4,5	419,23	406,91	398,11	391,51		4,5	353,68	343,61	336,05	330,17
	5,0	387,97	376,6	368,52	362,47		5,0	325,61	316,35	309,42	304,04
	5,5	360,9	350,42	343	337,47		5,5	301,53	293	286,65	281,72
	6,0	337,17	327,54	320,74	315,69		6,0	280,6	272,75	266,91	262,4
6,5	316,15	307,32	301,1	296,49	6,5	262,21	254,98	249,62	245,48		

Fonte: O Autor (2019)



Figura 32: Curva temperatura x cobrimento em vigas de 50 cm, para TRRF 60, 90 e 120 min.

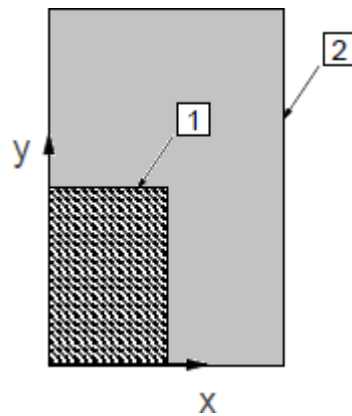


Fonte: O Autor (2019)

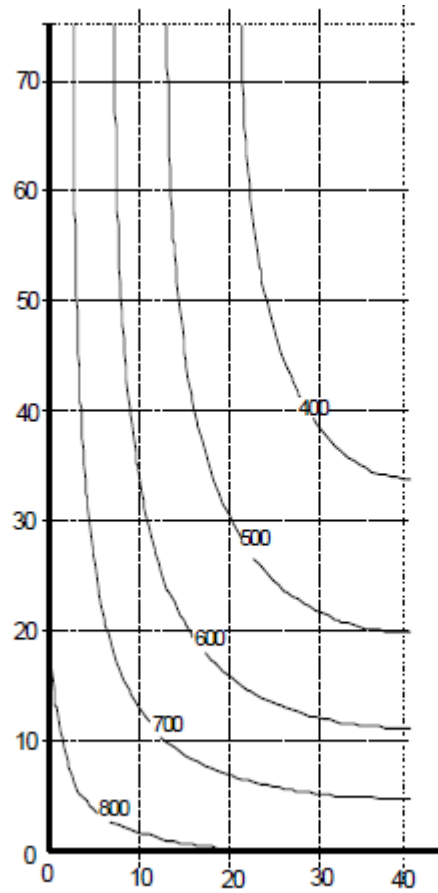
## ANEXO B

Os ábacos do ANEXO B foram retirados do Eurocode 2 – part 1-2 (2004) e baseiam-se no calor específico do concreto, condutividade, emissividade da superfície e coeficiente de convecção. Todas as linhas de temperaturas foram determinadas através de ensaios. Os ábacos estão em função do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), porém no Eurocode a nomenclatura do TRRF é apenas R.

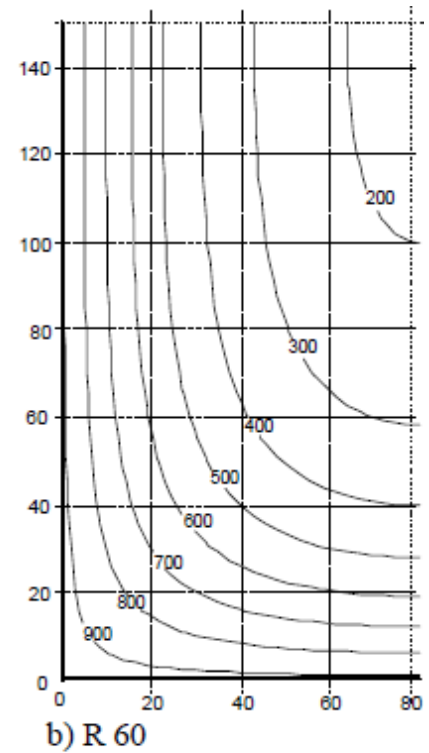
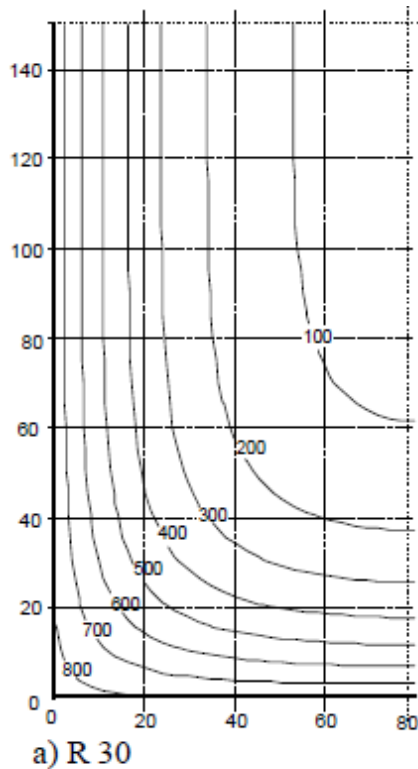
Figura 33: Superfície da seção transversal para a qual são apresentados os ábacos com as linhas de temperaturas. (1) Superfície da linha de temperatura. (2) Seção transversal total.



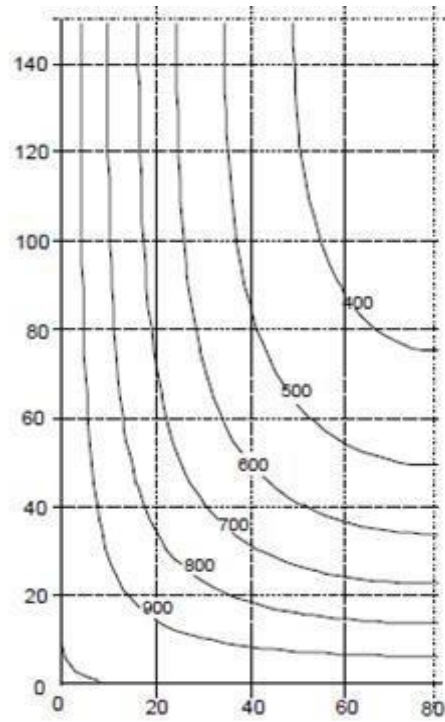
Fonte: Norma Europeia EN 1992-1-2: Eurocode 2 (2004)



Perfis de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) para uma viga,  $h \times b = 150 \times 80 - R 30$

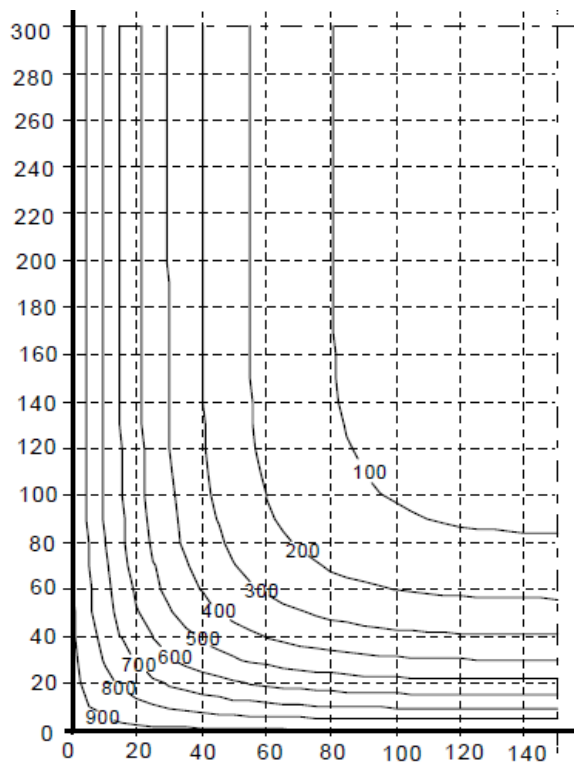


Perfis de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) para uma viga,  $h \times b = 300 \times 160$

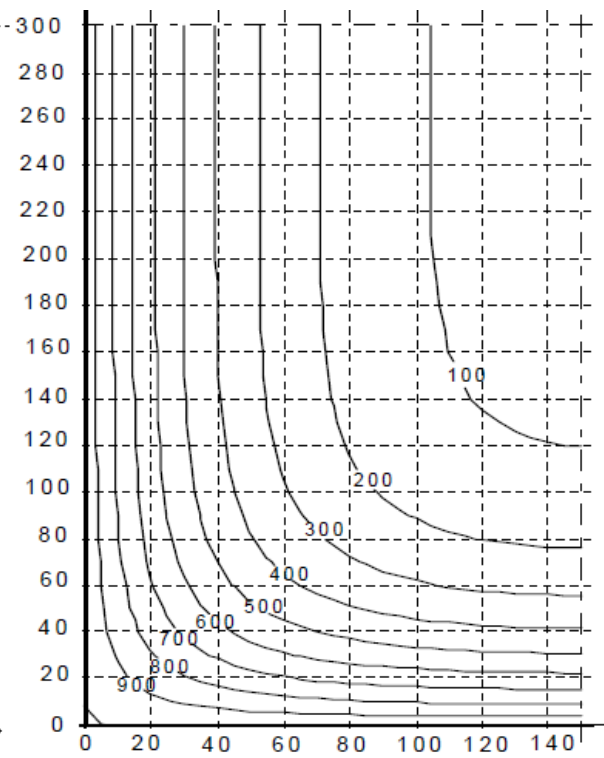


a) R 90

Perfis de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )  
para uma viga,  $h \times b = 300 \times 160$

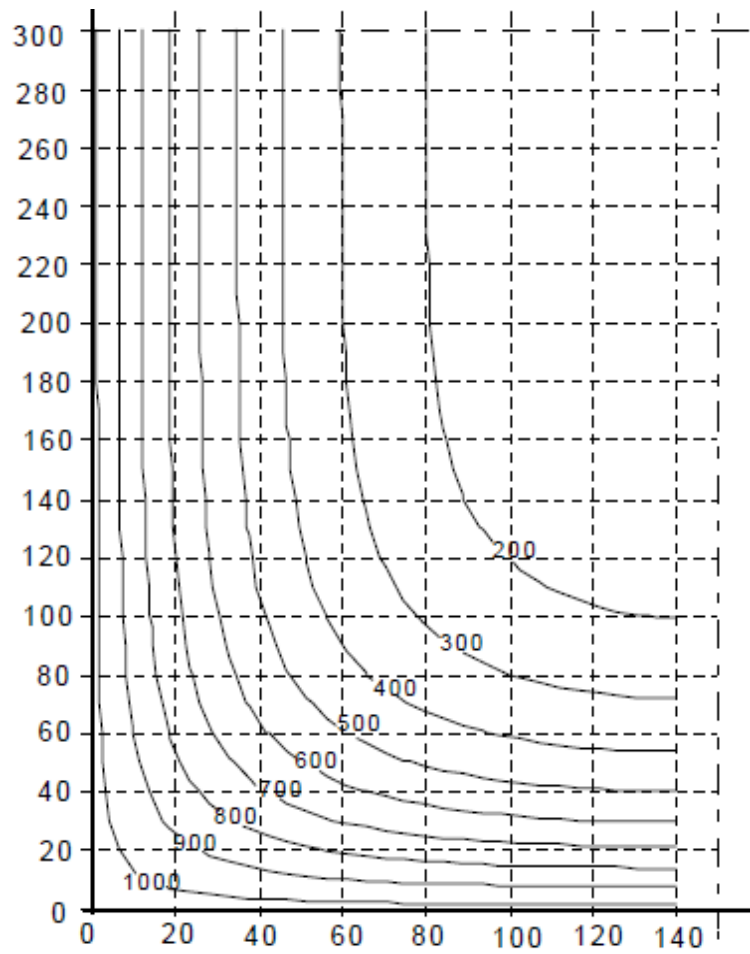


a) R 60

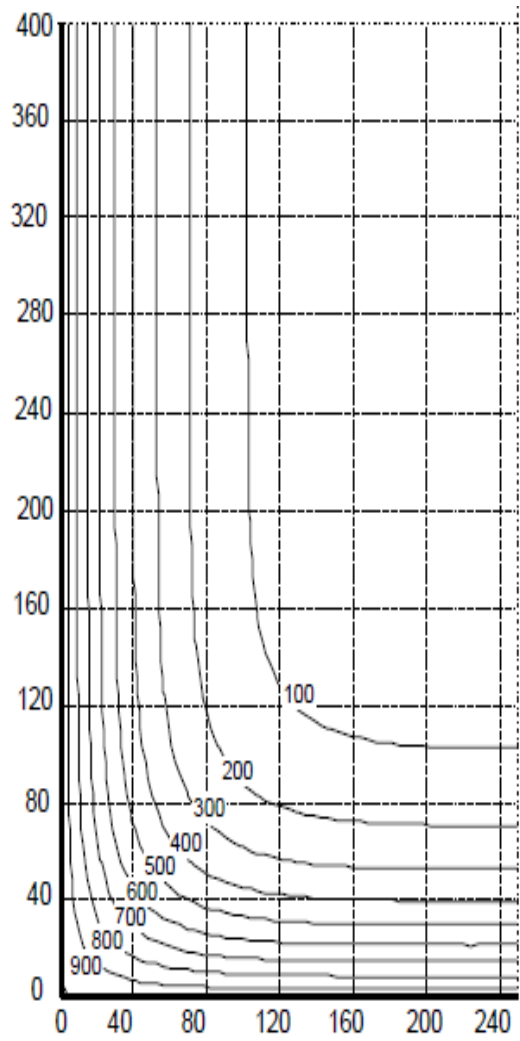


b) R 90

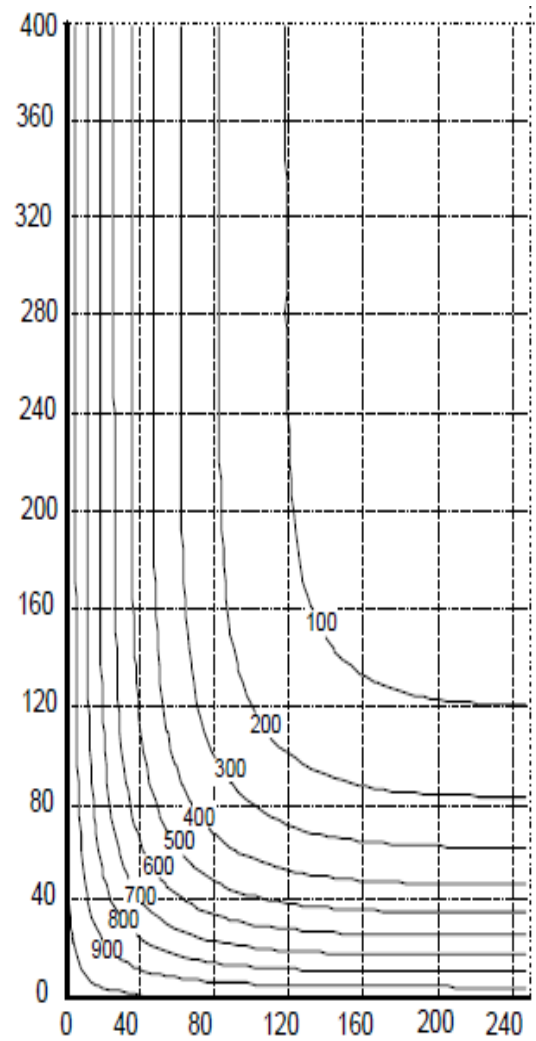
Perfis de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) para uma viga,  $h \times b = 600 \times 300$



Perfis de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) para uma viga,  $h \times b = 600 \times 300$  - R 120



a) R 90



b) R 120

Perfis de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) para uma viga,  $h \times b = 800 \times 500$