

**Universidade de Brasília - UnB**  
**Faculdade UnB Gama - FGA**  
**Curso de Engenharia de Energia**

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM UM  
FORNO MUFLA**

**Autores: Bruna Guedes Valério e Lucas Silva Bastos**  
**Prof. (Dr.): Fábio Alfaia da Cunha, UnB/FGA**

**Brasília, DF**

**2016**



**BRUNA GUEDES VALERIO e LUCAS SILVA BASTOS**

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM UM FORNO MUFLA**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. (Dr.): Fábio Alfaia da Cunha,  
UnB/FGA

**Brasília, DF**

**2016**

## **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Bruna Guedes, Lucas Bastos.  
Estudo da transferência de calor em um forno mufla - Brasília:  
UnB, 2016. 103 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2016. Orientação: Fabio Alfaia  
da Cunha.

1. Transferência de calor. 2. Calculo Numérico. 3. Radiação I.  
Alfaia, Fabio. II. Estudo da transferência de calor em um forno mufla.

CDU Classificação



**REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS DE  
GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA**

**Bruna Guedes Valerio e Lucas Silva Bastos**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 03/03/2017 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. (Dr.): Fábio Alfaia da Cunha, UnB/ FGA**

Orientador

---

**Prof. (Dr.): Luciano Gonçalves Noletto, UnB/ FGA**

Membro Convidado

---

**Prof. (Dr.): Augusto César de Mendonça Brasil, UnB/ FGA**

Membro Convidado

Brasília, DF

2016





## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por estar sempre presente na minha vida me ajudando a alcançar o sucesso em minhas metas. Agradeço a minha família, especialmente a minha mãe, Elenita, e a minha irmã, Marina, que sempre me deram todo o suporte e apoio nas minhas escolhas, me orientando, me aconselhando e me dando amparo nos momentos de tristeza e dificuldade. Aos meus amigos agradeço por toda a ajuda e paciência que me ofereceram. PH, você é incrível! Obrigada por tudo! Ao meu parceiro, Lucas Silva Bastos, pela companhia, amizade, paciência e esforço que apresentou não só no presente trabalho de conclusão de curso, mas em todo o curso de Engenharia de Energia. Agradeço, por fim, ao professor orientador deste trabalho, Dr. Fábio Alfaia da Cunha, que desempenhou seu papel de uma forma maravilhosa, pela paciência, pelos conselhos e orientações, por ter sanado nossas dúvidas e nos ajudado do início ao fim.

**Bruna Guedes Valerio**

Quero agradecer a todos que tornaram o presente artigo se tornar realidade. Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus, que sempre esteve ao meu lado. Agradeço minha família, em especial meus pais, Charles Bastos e Shirlei Bastos, que são a minha base e sem eles nada seria possível. Aos meus irmãos, Raphael Bastos e Matheus Bastos, meus amigos, todos os meus colegas da Matriz Engenharia de Energia, que me apoiaram e principalmente minha namorada Luiza Moreno, que me suportou e ajudou em todos os momentos, sendo essencial para que esse objetivo fosse alcançado. Quero agradecer a minha parceira, Bruna Guedes Valerio, por essa vitória que conquistamos juntos e por todos os momentos de amizade que compartilhamos durante todo o curso de graduação. Por fim, quero agradecer ao professor orientador, Dr. Fabio Alfaia da Cunha, que foi extremamente importante para a realização desse trabalho, nos auxiliando e motivando de maneira excepcional. Obrigado.

**Lucas Silva Bastos**





"O futuro vai mostra os resultados e julgar  
cada um segundo as suas realizações" Nikola Tesla.

## RESUMO

Todas as formas de energia são definitivamente importantes para o contexto da sociedade em que vivemos, principalmente para o ramo da engenharia. Assim, a necessidade de estudar mais a fundo a energia térmica na forma de calor se faz justificada. Conhecendo a importância do estudo da transferência de calor, o presente trabalho visa descrever esse fenômeno, calcular experimentalmente os valores de temperatura que as superfícies de um forno mufla hexaédrico pode atingir e estimar numericamente as taxas de transferência de calor do objeto de estudo em questão através de uma rede de resistências térmicas que interliga as superfícies do forno, tornando possível analisar os efeitos das radiações exercidas nesse meio. No trabalho são apresentados a fundamentação teórica sobre os principais pontos do estudo, um método analítico para resolução do problema, a metodologia numérica utilizada para os cálculos de transferência de calor e, por fim, o método e resultados experimentais alcançados.

**Palavras-chave:** Transferência De Calor, Calculo Numérico, Radiação.

**ABSTRACT**

All forms of energy are definitely important for the context of the society in which we live, especially for engineering. Thus, the need to further study thermal energy in the form of heat is justified. The present work aims to describe, experimentally calculate the temperature values that the surfaces of a hexahedral muffle furnace can reach and numerically estimate the heat transfer rates of the object of study in question through a network of thermal resistances that interconnects the surfaces of the furnace, making it possible to analyze the effects of the radiations exerted. To achieve this objective, a study was carried out on the concepts and parameters involved in this system. The theoretical basis on the main points of the study, an analytical method to solve the problem, the numerical methodology used for heat transfer calculations, and finally the experimental and numerical results achieved are presented here.

**Keywords:** Heat Transfer, Numerical Calculation, Radiation.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação da primeira lei da termodinâmica.....	4
Figura 2 - Transferência de calor tridimensional. ....	5
Figura 3 - Transferência de calor bidimensional.....	6
Figura 4 - Transferência de calor unidimensional.....	6
Figura 5 - Modo de Transferência de calor por convecção.....	7
Figura 6 - Modo de Transferência de calor por condução. ....	8
Figura 7 - Modo de Transferência de calor por radiação. ....	9
Figura 8 - Geometria para determinação do fator de forma entre duas superfícies. ....	12
Figura 9 - Balanço de radiação no nó referente à superfície 1.....	16
Figura 10 - Forno mufla da marca Fornitec modelo F2 (Fornitec).....	22
Figura 11 - Modelo da disposição das superfícies no forno. ....	23
Figura 12 – Exemplo de termopar tipo K.....	25
Figura 13 - Esquema de Junção para Termopar.....	25
Figura 14 - Gráfico da relação f.e.m. x temperatura. ....	26
Figura 15 – Multímetro T M 108. ....	27
Figura 16 - Esquema de calibração do termopar.....	28
Figura 17 - Temperatura medida no local dá realização do experimento de calibração.....	29
Figura 18 - Medição do multímetro em 0,9 mV; medição do termômetro em 0,8°C e a ponta do termopar em cima do multímetro medindo a temperatura ambiente. ....	30
Figura 19 - Junção dos terminais do termopar dentro de um recipiente isolante.....	30
Figura 20- Reprodução do experimento de medição em condição inicial. ....	33
Figura 21 – Reprodução do experimento de medição ao passo de 29 segundos. ....	34
Figura 22 - Reprodução do experimento de medição ao passo de 121 segundos.....	34
Figura 23 - Identificação da falha na superfície 1.....	35
Figura 24- Fator de Forma Paralelo (Çengel, 2012). ....	36
Figura 25 - Fator de Forma Perpendicular (Çengel, 2012).....	37
Figura 26 – Gráfico da propagação de erros da parede direita (5).....	43
Figura 27 - Gráfico Tensão (mV) x Tempo (s). ....	44
Figura 28 - Gráfico Temperatura (° C) x Tempo (s). ....	45
Figura 29 - Gráfico Radiosidades (J) x Tempo (t). ....	49
Figura 30 – Gráfico taxa de transferência de calor x tempo. ....	51
Figura 31 - Gráfico da propagação de erros da parede esquerda. ....	63
Figura 32 - Gráfico da propagação de erros da parede teto. ....	63

Figura 33 - Gráfico da propagação de erros da parede base. ....	64
Figura 34 - Gráfico da propagação de erros da parede fundo. ....	64
Figura 35 - Gráfico da propagação de erros da parede frente. ....	65
Figura 36 - Tabela de conversão Tensão/Temperatura do termopar tipo K (parte 1/4).....	75
Figura 37 - Tabela de conversão Tensão/Temperatura do termopar tipo K (parte2/4).....	76
Figura 38 - Tabela de conversão Tensão/Temperatura do termopar tipo K (parte 3/4).....	77
Figura 39 - Tabela de conversão Tensão/Temperatura do termopar tipo K (parte 4/4).....	78

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados do forno mufla. Fonte Fornitec.....	22
Quadro 2 - Nome das superfícies do forno .....	23
Quadro 3 - Emissividade de alguns materiais. Fonte: Fluke.....	24
Quadro 4 - Temperaturas medias nos dias das medições.....	32
Quadro 5 - Valores obtidos experimentalmente parta a parede direita (5). .....	42
Quadro 6 - Resumo dos resultados experimentais obtidos. ....	47
Quadro 7 - Valores obtidos experimentalmente parta a parede esquerda (2) .....	58
Quadro 8 - Valores obtidos experimentalmente parta a parede Teto (6) .....	59
Quadro 9 - Valores obtidos experimentalmente parta a parede Base (1).....	60
Quadro 10 - Valores obtidos experimentalmente parta a parede Fundo (4) .....	61
Quadro 11 - Valores obtidos experimentalmente parta a parede Frente (3) .....	62



**LISTA DE SIMBOLOS**

$A$	Área [ $m^2$ ]
$E$	Potência emissiva [ $W/m^2$ ]
$F$	Fator de Forma
$G$	Irradiação [ $W/m^2$ ]
$I$	Intensidade de radiação [ $W/m^2 \cdot sr$ ]
$J$	Radiosidade [ $W/m^2$ ]
$N$	Número de superfícies
$q$	Fluxo térmico [ $W/m^2$ ]
$T$	Temperatura [ <i>Celsius</i> ]
$\epsilon$	Emissividade
$\sigma$	Constante de Stefan- Boltzmann [ $W/m^2 \cdot K^4$ ]



## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	2
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	2
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	2
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>3</b>
2.1 ENERGIA E TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	3
2.2 CLASSIFICAÇÕES DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	4
2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO .....	7
2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO .....	8
2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO .....	9
2.4.1 <i>Condições inicial e de contorno</i> .....	10
2.4.2 <i>Corpo Negro e Corpo Cinza</i> .....	11
2.4.3 <i>Fator de Forma</i> .....	11
2.4.4 <i>Troca de radiação entre superfícies cinza, difusas e opacas</i> .....	13
2.4.5 <i>Rede de Resistências Térmicas</i> .....	14
2.5 OBTENÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS .....	16
2.5.1 <i>Medir</i> .....	17
2.5.2 <i>Erros de medição</i> .....	17
2.5.3 <i>Calibração</i> .....	19
<b>3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>21</b>
3.1 MATERIAIS .....	21
3.1.1 <i>Forno mufla</i> .....	21
3.1.2 <i>Termopar Tipo K</i> .....	24
3.1.4 <i>Multímetro</i> .....	27
3.2 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES TERMOPAR .....	27
3.3 MEDIÇÕES .....	31
<b>4. METODOLOGIA NUMÉRICA</b> .....	<b>36</b>
4.1 CÁLCULO DA RADIOSIDADE E DO FATOR DE FORMA.....	36
4.1.2 <i>Cálculo da Radiosidade</i> .....	37
4.1.3 <i>Cálculo Numérico das Taxas de Transferência de Calor Por Radiação</i> .....	40
4.2 CÓDIGO NUMÉRICO.....	40

<b>5. RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>40</b>
5.1 ANALISE EXPERIMENTAL .....	41
5.2 ANALISE NUMÉRICA .....	47
5.2.1 <i>Fatores de forma</i> .....	47
5.2.2. <i>Radiosidades J</i> .....	48
5.2.3. <i>Taxas de Transferência de Calor q</i> .....	50
<b>6. CONCLUSAO .....</b>	<b>52</b>
<b>REFERENCIAL BIBLIOGRAFICO .....</b>	<b>55</b>
<b>APENDICES.....</b>	<b>56</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>74</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A sociedade global necessita de diversas formas de energia para a realização de tarefas básicas e cotidianas. A energia térmica é uma das formas mais frequentemente utilizadas pela humanidade. Torna-se vital para um engenheiro a compreensão do que é e de como se dá a transferência de calor em diferentes situações.

Sempre que existe uma diferença de temperatura entre dois meios é observado um transito de energia térmica, que neste caso é definido como calor, isso acontece espontaneamente, até que o equilíbrio térmico seja estabelecido. Essa transferência de energia térmica pode ocorrer através de três mecanismos diferentes: a condução, a convecção e a radiação térmica (INCROPERA; DEWITT, 2008).

As três formas de transferência de calor podem ser observadas no funcionamento de um forno, que é uma aplicação amplamente utilizada tanto no âmbito da culinária como no laboratorial, na execução de pesquisas e análises químicas. Nessas aplicações tem-se, em geral, um elemento de aquecimento, um meio de transferência de calor e um elemento a ser aquecido. Porém, vale ressaltar que dentre as formas de transferência de calor, a radiação é a que mais influência nos processos estudados. De acordo com Ibrahim e Salleh (2012), ao se analisar um forno com uma panela dentro, a quantidade de calor transferida pela mufla ao corpo em seu interior proveniente dos fenômenos de convecção e condução não chegam a uma taxa de 10% da quantidade total.

Dentre os tipos de fornos encontrados em um laboratório de química existe a mufla. Trata-se de um tipo de forno usado quando se deseja o alcance de altas temperaturas, principalmente na calcinação de substâncias. Nesse processo uma amostra é submetida a temperaturas a cima de 1000°C fazendo com que ocorram transformações fisicoquímicas como a eliminação de substâncias voláteis e a produção de óxidos. Para que um estudo como o de uma calcinação seja bem-sucedido é essencial o conhecimento de como o material reage ao aquecimento.

Com base no apresentado, o objetivo deste trabalho é descrever a transferência de calor em um forno mufla. A importância desse estudo está associada à importância da própria mufla como instrumento laboratorial, que pode ser utilizada no estudo de vários processos térmicos, incluídos na produção, caracterização térmica e no controle de qualidade de produtos. São exemplos os tratamentos térmicos: teste de ignição; queima ou calcinação de materiais; fusão;

decomposição e digestão para análises químicas; análises gravimétricas; processos de envelhecimento térmico e incinerações.

A transferência de calor por radiação no forno mufla pode ser descrita adequadamente em termos do fator de forma, da potência emissiva, da irradiação, da radiosidade e da emissividade das paredes. Já a transferência de calor por condução acontece nas paredes do forno, estando intimamente relacionada às características dessa superfície.

## **1.1 Objetivos**

Os objetivos gerais e específicos do trabalho são apresentados nessa sessão.

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem o objetivo de estudar a transferência de calor em um forno mufla.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

1. Estudar os fundamentos da transferência de calor em um forno mufla, a definição do fator de forma na transferência de calor por radiação bem como as condições iniciais e de contorno da transferência de calor pelos diferentes modos;
2. Apresentar os métodos analíticos e computacionais utilizados para o cálculo do fator de forma entre as superfícies de um forno;
3. Calcular as taxas de transferência de calor no interior do forno através do método de rede de resistências térmicas, que interliga as superfícies no interior da mufla;
4. Utilizar ferramenta computacional para realizar o cálculo de transferência de calor;
5. Analisar resultados obtidos a partir de uma abordagem experimental;
6. Demonstrar possíveis melhorias/mudanças nos modelos computacionais estudados;
7. Fazer a análise dos resultados e apresentar as devidas conclusões.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

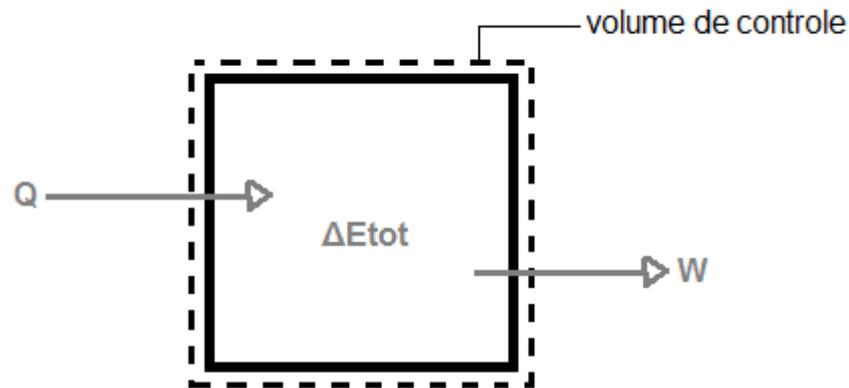
Este capítulo tem por finalidade descrever as bases teóricas nas quais as análises desenvolvidas nesse estudo estão fundamentadas. Possui em seu conteúdo as teorias e equações chave que permitiram a obtenção dos resultados que serão mostrados adiante.

### 2.1 Energia e Transferência de Calor

Existem inúmeras definições de energia, assim como inúmeras formas de contabilizar energia. Porém, para esse estudo, serão considerados apenas os modelos que quantificam os valores de energia em trânsito, em especial energia térmica em forma de calor. Segundo Incropera e Dewitt (2008) o conceito de transferência de calor é, de maneira simplificada, “energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço”. Essa definição, apesar de simples, abrange todo o escopo deste trabalho.

Segundo Çengel (2012), uma das principais leis da natureza é o princípio da conservação de energia. De acordo com ela a energia não pode ser criada ou destruída. Acontece que durante uma interação a energia pode mudar de uma forma para outra ou ser transferida de um lugar para outro, mas a quantidade total de energia é conservada, mesmo que os valores das parcelas que contribuem para o valor do somatório variem.

Ainda conforme Çengel (2012), quando a energia não está armazenada em um sistema ela pode ser entendida como uma forma dinâmica de energia, podendo ser observada à medida que atravessa a fronteira do sistema transpondo-o ou deixando-o durante um processo. Ao se tratar de um sistema fechado as duas únicas formas de interação de energia associadas a esse sistema são a transferência de calor e o trabalho realizado no sistema ou pelo sistema, sendo transferência de calor quando uma diferença de temperatura for o que rege essa interação. A primeira lei da termodinâmica quando aplicada a um sistema fechado fala exatamente isso e pode ser ilustrada da seguinte forma, onde ocorre troca de energia entre um sistema fechado e o meio externo através da fronteira.



**Figura 1** - Representação da primeira lei da termodinâmica.

A expressão matemática que representa esta lei é:

$$\Delta E_{tot} = Q - W \quad (2.1)$$

A energia total,  $\Delta E_{tot}$ , corresponde a soma da energia mecânica (cinética e potencial) com a energia interna do sistema (térmica, química, nuclear, entre outras). Sabendo disso, é possível escrever a primeira lei de uma forma mais adequada à análise da transferência de calor se for observado que a geração de energia térmica resulta na conversão de energia. Sendo assim, pode-se dizer que o aumento na energia total de um sistema deve corresponder à quantidade de energia térmica e mecânica que entra no volume de controle menos a quantidade de energia térmica e mecânica que sai, mais a quantidade de energia térmica que é gerada dentro de volume de controle. Chega-se então a equação seguinte:

$$\Delta E_{tot} = Q_{ent} - Q_{sai} + E_{ger} \quad (2.2)$$

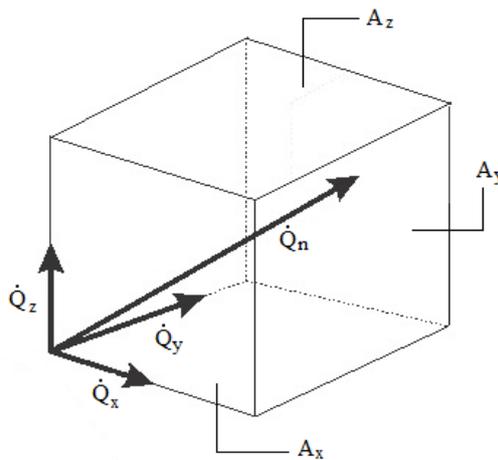
Na transferência de calor a energia térmica pode ser transferida por três diferentes modos: por condução, por convecção e por radiação e os problemas que envolvem transferência de calor podem ser classificados em permanentes ou transientes (ÇENGEL; 2012). A ciência que estuda esse fluxo de calor é chamada de transferência de calor.

## 2.2 Classificações da Transferência de Calor

A transferência de calor pode ser classificada segundo a alteração de meio como permanente ou transiente. O regime permanente implica na ausência de variação em qualquer ponto do meio durante um período  $\Delta T$ , enquanto no regime transiente existe variação ao longo do tempo (ÇENGEL; 2012). Por exemplo, a transferência de calor através de um forno mufla desligado é permanente quando as condições internas e externas do forno permanecem

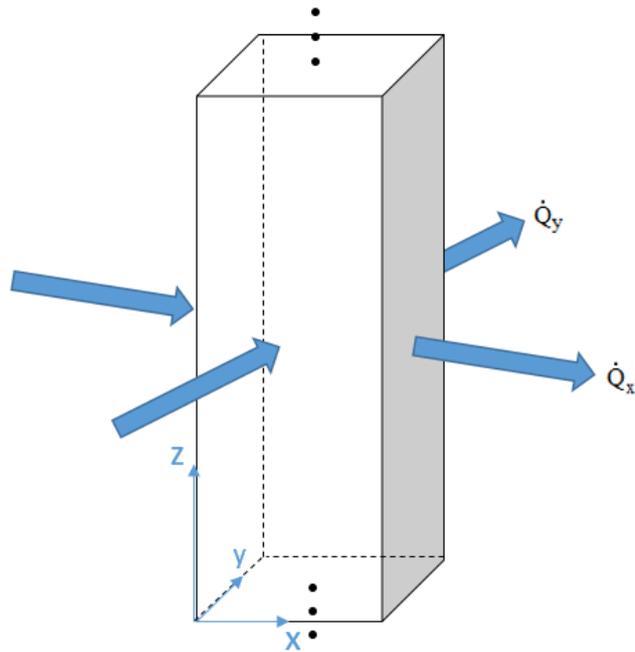
constantes por um longo período de tempo. Já quando o forno mufla está ligado, a temperatura em qualquer ponto dele varia com o tempo, sendo um caso de transferência de calor transiente.

Uma outra classificação é quanto às direções da transferência de calor e do nível de exatidão desejado. Nesse quesito os problemas podem ser classificados em unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais. Na maioria das vezes os casos de transferência de calor são tridimensionais, ou seja, a temperatura varia ao longo das coordenadas retangulares  $x$ ,  $y$  e  $z$  (INCROPERA; DEWITT, 2008), um exemplo de meio onde isso acontece é o forno mufla.



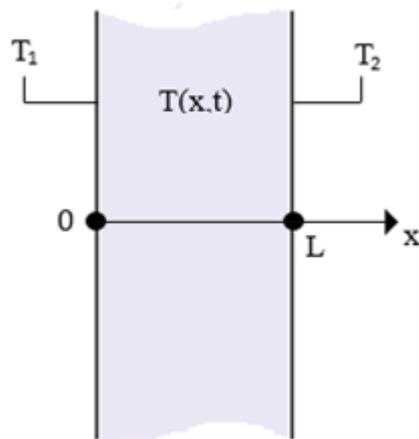
**Figura 2** - Transferência de calor tridimensional.

Em algumas situações a diferença de temperatura acontece principalmente em duas direções e na terceira dimensão a variação é desprezível, nesses casos a transferência de calor é bidimensional. Essa situação acontece quando é considerada uma barra infinitesimalmente longa de seção transversal retangular, nesse caso a distribuição permanente de temperatura pode ser representada por  $T(x,y)$ .



**Figura 3** - Transferência de calor bidimensional.

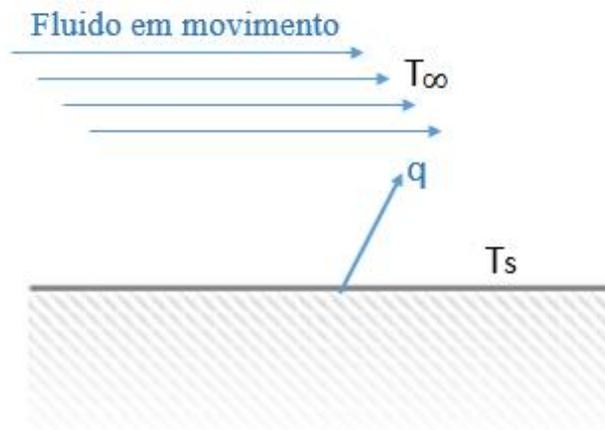
Por fim, o caso é unidimensional quando a temperatura varia em uma única dimensão. Um exemplo dessa situação é quando se pretende calcular a transferência de calor através de uma das paredes de um forno mufla. Essa transferência ocorre quase que por completo na direção normal à superfície da parede, podendo-se desprezar a transferência que ocorre nas outras direções.



**Figura 4** - Transferência de calor unidimensional.

### 2.3 Transferência de Calor por Convecção

No caso da transferência de calor por convecção a transição do calor ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento que está com temperatura diferente. Nessa situação tem-se dois mecanismos de transferência de energia: o que ocorre devido o movimento molecular e o que provem do movimento global do fluido (INCROPERA; DEWITT, 2008). De acordo com Çengel (2012), na ausência de movimento da massa de fluido a transferência de calor acontece puramente por condução e quanto maior for a velocidade do fluido, maior será a taxa de transferência de calor.



**Figura 5** - Modo de Transferência de calor por convecção.

Por se tratar da transferência de calor através de um fluido, fica claro que a taxa de transferência está fortemente relacionada não só às características da superfície como também às propriedades desse fluido como a viscosidade dinâmica, a condutividade térmica, a densidade e o calor específico. Por esse motivo acredita-se que o modo de transferência de energia térmica por convecção pode ser o mais complexo da transferência de calor.

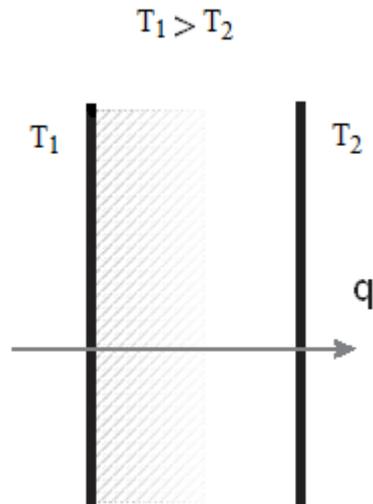
Apesar da complexidade a transferência de calor é bem representada pela lei de Newton do resfriamento como:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (W) \quad (2.3)$$

Onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção,  $A_s$  é a área de transferência de calor,  $T_s$  é a temperatura da superfície e  $T_\infty$  é a temperatura do fluido suficientemente longe da superfície (INCROPERA; DEWITT, 2008).

### 2.3 Transferência de Calor por Condução

Segundo Incropera e DeWitt (2008), o processo de transferência de calor por condução ocorre em nível atômico. A partir das interações entre as partículas de um meio sólido, líquido ou gasoso a energia passa de células mais energéticas para as células menos energéticas da substância quando existe uma interação entre elas.



**Figura 6** - Modo de Transferência de calor por condução.

Em sólidos, como na parede de um forno, a transferência de calor se dá em resultado às vibrações das moléculas em rede, onde a energia é transportada através dos elétrons livres. A taxa com que essa transferência de energia térmica se desloca depende da espessura, da geometria, da diferença de temperatura e do material que compõe o meio em questão (ÇENGEL; 2012). Relacionando todos esses termos, pode ser apresentada a equação para a taxa de condução de calor  $\dot{Q}_{cond}$  através de uma camada plana, onde  $(T_2 - T_1)$  equivale à diferença de temperatura, a constante  $k$  (condutividade térmica) representa a parte referente ao material que compõe a camada, a espessura é  $\Delta x$ , e a área ( $A$ ) está ligada a geometria da placa. Assim, para um problema unidimensional tem-se:

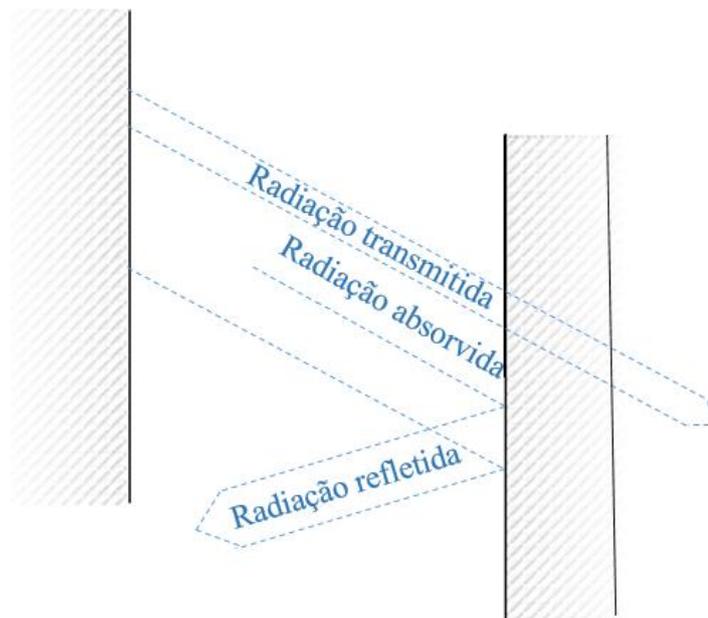
$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad (2.4)$$

E para um problema multidimensional tem-se:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Taxa de} \\ \text{condução} \\ \text{de calor em} \\ x, y \text{ e } z \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Taxa de} \\ \text{condução} \\ \text{de calor em} \\ x + \Delta x, \\ y + \Delta y \text{ e } z + \Delta z \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Taxa de} \\ \text{geração de} \\ \text{calor dentro} \\ \text{do elemento} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Taxa de variação} \\ \text{da energia} \\ \text{do elemento} \end{array} \right) \quad (2.5)$$

## 2.4 Transferência de Calor por Radiação

A terceira forma de como pode se dar a transferência de calor é a radiação térmica. Esta se dá em qualquer superfície que apresente temperatura diferente de zero, pois trata-se da energia que é liberada por ondas eletromagnéticas sem a necessidade de contato entre os corpos (INCROPERA; DEWITT, 2008).



**Figura 7** - Modo de Transferência de calor por radiação.

No âmbito da transferência de calor o que mais interessa a esse estudo é a radiação térmica. Trata-se daquela que é emitida por qualquer corpo sólido, líquido ou gasoso, que tenha sua temperatura superior ao zero absoluto. Este modo de transferência de calor acontece de forma mais rápida que os outros, não sofre atenuação no vácuo e não necessita da presença de um meio material para acontecer.

Em 1864 o físico James Clerk Maxwell postulou que cargas aceleradas ou variações de correntes elétricas criam campos elétricos e magnéticos, estes campos são chamados de radiação eletromagnética e são a representação da energia que a matéria emite como efeito das mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas. A radiação térmica engloba as radiações visível, infravermelha e uma parte das radiações ultravioleta (ÇENGEL; 2012).

Ainda de acordo com Çengel e (2012), na transferência de calor por radiação entre duas superfícies, uma parte da radiação incidente é absorvida pelo material, parte é refletida da

superfície e o restante, se houver, é transmitido pelo corpo. Esse fenômeno foi representado na figura 7.

A taxa de radiação térmica é proporcional ao aumento da temperatura, visto que a temperatura é uma medida da agitação das moléculas e estas possuem cargas que, por sua vez, emitem radiação quando estão em movimento acelerado.

#### 2.4.1 Condições inicial e de contorno

Para um cálculo mais completo da transferência de calor em um meio é necessária a consideração das condições físicas e térmicas em que se encontram as fronteiras desse meio. As equações matemáticas que descrevem as condições térmicas dessas fronteiras são chamadas de condições de contorno. Caso essas condições variem com o tempo, a solução também vai depender de uma condição a qual a fronteira se encontra inicialmente, a expressão matemática dessa condição dá-se o nome de condição inicial e ela pode se apresentar da seguinte forma geral (INCROPERA; DEWITT, 2008):

$$T(x, y, z, t) = f(x, y, z) \quad (2.6)$$

No cálculo de transferência de calor duas condições de fronteira devem ser descritas para cada coordenada espacial do sistema que tenha transferência de calor significativa, isso porque a equação do calor é de segunda ordem para todas as direções em que a condução do calor é relevante (INCROPERA; DEWITT, 2008).

##### 2.4.1.1 Condição de Contorno de Temperatura Especificada

A especificação da temperatura da superfície é geralmente utilizada para definir as condições de contorno devido a facilidade que se tem de conseguir essa informação. Por exemplo, quando existe uma situação de transferência de calor unidimensional em uma parede plana de espessura  $L$ , e as temperaturas ( $T_1$  e  $T_2$ ) das superfícies são conhecidas, as condições de contorno para esse problema podem ser descritas por:

$$\begin{aligned} T(0, t) &= T_1 \\ T(L, t) &= T_2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

As temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  são constantes quando tratar-se de um problema de regime permanente ou podem variar com o tempo no caso de um problema de regime transiente (ÇENGEL; 2012).

### 2.4.2 Corpo Negro e Corpo Cinza

O outro aspecto que influencia nessa taxa é a composição do corpo. Como a composição da matéria de diversos corpos varia justamente pela infinita combinação de átomos e moléculas, é possível inferir que a radiação emitida por cada corpo varia de acordo com sua composição final. Para servir como padrão na comparação das características radioativas de corpos reais foi criado o conceito de corpo negro. Um corpo que possui a característica ideal de ser um perfeito emissor e um perfeito absorvedor de radiação, independente do comprimento de onda e da direção, é denominado corpo negro (ÇENGEL, 2012).

De acordo com Incropera (2008) as três principais características do corpo negro são:

- Toda a radiação incidente é absorvida pelo corpo negro, independente do comprimento e da direção da onda, sendo assim, nenhuma parcela da radiação sofre reflexão;
- O corpo negro emite maior energia que qualquer outra superfície quando na mesma temperatura e comprimento de onda;
- O corpo negro é um emissor difuso, isto é, a radiação que ele emite depende do comprimento de onda e da temperatura, mas independe da direção.

A taxa máxima de radiação emitida por um corpo negro é dada pela lei de Stefan-Boltzmann como:

$$q = A\sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.8)$$

Onde A é a área da superfície, T representa temperatura e a letra grega  $\sigma$  representa a constante de Boltzman e vale  $5,670 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4\text{)}$ .

Diferente do corpo negro, o corpo cinza, que também é um conceito irreal, absorve parcialmente a radiação que o atinge e pode emitir radiação em diferentes níveis. Além disso, nele a emissividade é monocromática e depende exclusivamente da temperatura.

Em 1879 Joseph Stefan determinou experimentalmente a chamada potência emissiva do corpo negro, representada por  $E_b$  e expressa por:

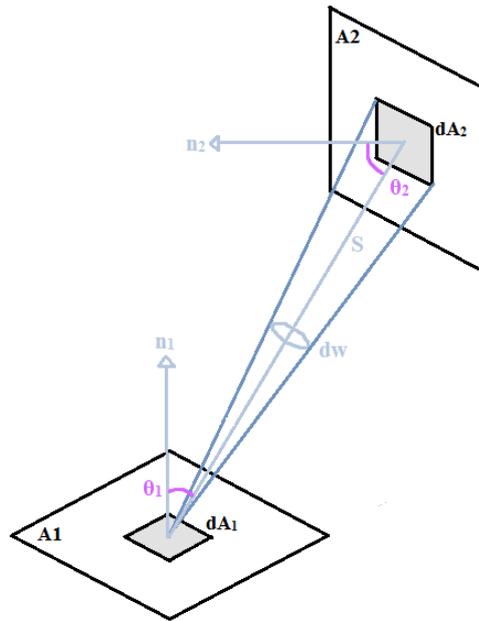
$$E_b(T) = T^4 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.8)$$

### 2.4.3 Fator de Forma

Sendo a transferência de calor por radiação oriunda das propriedades de radiação, da temperatura e da orientação entre os corpos, observa-se a necessidade da elucidação do conceito

de fator de forma, que é o parâmetro que trata da parte referente a orientação e geometria dos corpos.

O fator de forma  $F_{ij}$  é definido como a fração de radiação que deixa a superfície  $i$  e atinge a superfície  $j$ . Para o desenvolvimento da expressão geral do fator de forma, duas superfícies diferenciadas difusas ( $dA_1$  e  $dA_2$ ) devem ser consideradas de acordo com a figura 8.



**Figura 8** - Geometria para determinação do fator de forma entre duas superfícies.

Tendo  $S$  como a distância entre  $dA_1$  e  $dA_2$ ,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  representando os ângulos entre a normal da superfície ( $n_1$  e  $n_2$ ) e a linha de radiação e sendo  $d\omega$  o ângulo sólido, a expressão geral do fator de forma é dada pela equação:

$$F_{ij} = F_{A_i \rightarrow A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi S^2} dA_i dA_j \quad (2.10)$$

Conhecendo essa expressão, existem algumas propriedades do fator de forma que precisam ser entendidas, segundo Incropera (2008) elas são a relação de reciprocidade e a regra da soma.

A relação de reciprocidade é utilizada para determinar um fator de forma a partir de outro já conhecido. Ela é dada por:

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (2.11)$$

Ao se tratar de uma cavidade fechada outra relação importante deve ser levada em consideração: a regra da soma. De acordo com Incropera (2008) essa regra pode ser aplicada a

qualquer superfície no interior da cavidade e existe pelo fato de que toda a radiação que deixa a superfície  $i$  deve ser interceptada pelas superfícies da cavidade. Essa regra é expressa por:

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (2.12)$$

#### 2.4.4 Troca de radiação entre superfícies cinza, difusas e opacas

Segundo Çengel (2012) a potência emissiva ( $E$ ) é a taxa na qual a energia de radiação é emitida por unidade de área da superfície emissora e a irradiação é o fluxo de radiação incidente sobre uma superfície. Esta última é representada pela letra  $G$ . A emissividade é a razão entre a radiação que é emitida pela superfície e a radiação emitida por um corpo negro, considerando os dois operando a mesma temperatura. A emissividade é representada pela letra grega  $\varepsilon$ . Já radiosidade é definida como a energia de radiação total que deixa a superfície por unidade de tempo e por unidade de área. Ela é representada pela letra  $J$  e, ao se tratar de uma superfície  $i$ , pode ser definida pela equação:

$$J_i = E_i + \rho_i G_i \quad (2.13)$$

A troca de calor por radiação entre superfícies opacas envolve emissão, reflexão e absorção. A energia térmica deixa uma superfície por emissão e reflexão e atinge outra superfície, onde será parte refletida, parte absorvida.

Quando essa troca de calor envolve várias superfícies em uma cavidade, algumas considerações podem ser feitas a fim de simplificar a análise. Considera-se que cada superfície seja isotérmica e tenha radiosidade e irradiação uniformes, além de se comportarem como sendo cinzas, difusas e opacas. Outra simplificação é a de que o meio no interior da cavidade seja não-participante.

Feitas as simplificações, tem-se que a taxa líquida que deixa uma superfície  $i$  ( $q_i$ ) é igual a diferença entre a radiosidade da superfície e a sua irradiação, podendo ser escrita na forma

$$q_i = A_i(J_i - G_i) \quad (2.14)$$

Combinando as equações (2.15) e (2.16) e sabendo que para superfícies opacas, difusas e cinzas  $\rho_i = 1 - \alpha_i = 1 - \varepsilon_i$ , é possível escrever a transferência radiante líquida na superfície em termos da emissão e da irradiação absorvida da superfície como

$$q_i = A_i(E_i - \alpha_i G_i) \quad (2.15)$$

e

$$J_i = \varepsilon_i E_{bi} + (1 - \varepsilon_i) G_i \quad (2.16)$$

Substituindo  $G_i$  na equação 2.16 tem-se que

$$q_i = A_i \left( J_i - \frac{J_i - \varepsilon_i E_{bi}}{1 - \varepsilon_i} \right) \quad (2.17)$$

Reorganizando:

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \varepsilon_i)/\varepsilon_i A_i} \quad (2.18)$$

A transferência representada por essa equação está associada ao potencial motriz  $E_{bi} - J_i$  e a uma resistência  $(1 - \varepsilon_i)/\varepsilon_i A_i$ . Desde modo se  $q_i > 1$  então existe uma transferência de calor líquida por radiação saindo da superfície. Se  $q_i < 1$ , a transferência de calor se dá para a superfície.

É necessário que a radiosidade  $J_i$  seja conhecida para que a equação 2.20 possa ser utilizada. Pela definição do fator de forma tem-se que

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ji} A_j J_j \quad (2.19)$$

E, pela equação da reciprocidade,

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} J_j \quad (2.20)$$

Calculando a área  $A_i$ , substituindo  $G_i$  na equação 2.16 e aplicando a regra da soma, tem-se

$$q_i = A_i \left( \sum_{j=1}^N F_{ij} J_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j \right) \quad (2.21)$$

Então,

$$q_i = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} (J_i - J_j) \quad (2.22)$$

A radiosidade para cada superfície pode ser avaliada a partir da resolução sistema linear obtido com a combinação das equações 2.20 e 2.24.

$$\frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \varepsilon_i)/\varepsilon_i A_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{(A_i F_{ij})^{-1}} \quad (2.23)$$

#### 2.4.5 Rede de Resistências Térmicas

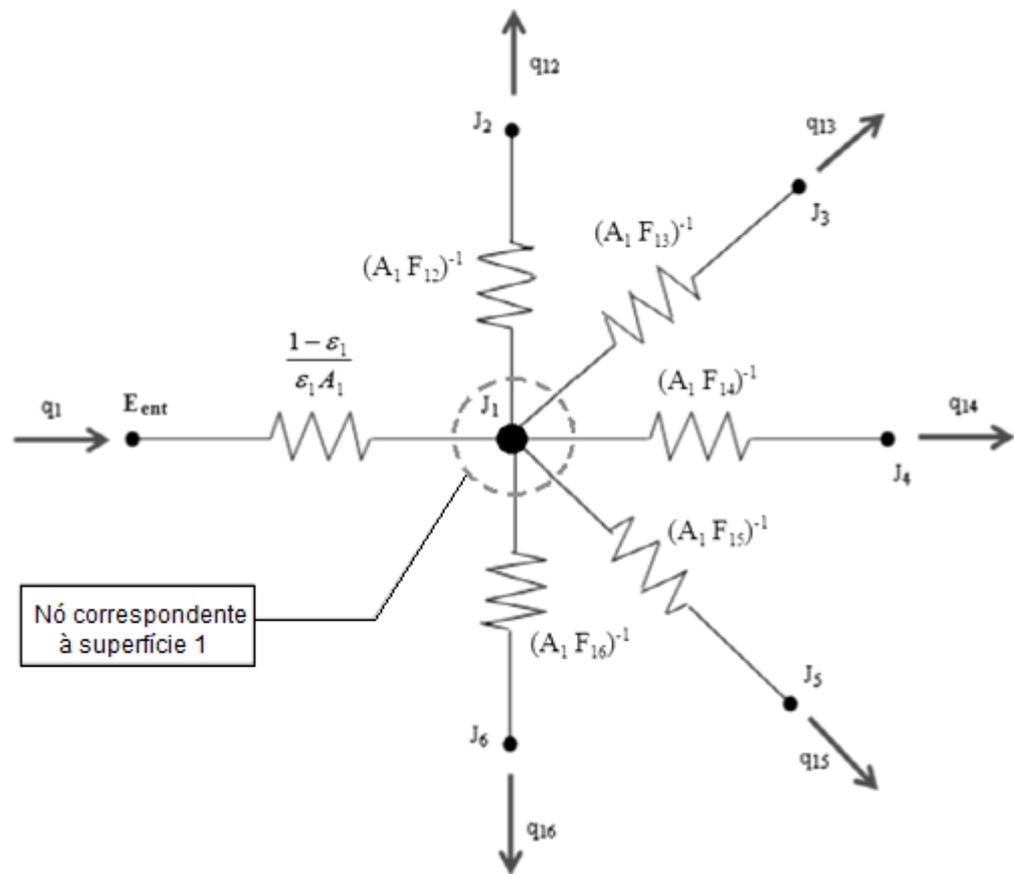
A fim de proporcionar uma melhor visualização da troca de calor por radiação em uma cavidade, o balanço de energia radiativa pode ser representado por uma rede de resistências

térmicas. Em comparação com uma rede eléctrica,  $E_{b_i}$  e  $J_i$  são semelhantes ao potencial e  $Q_i$  e  $q_{ij}$  são semelhantes à corrente e às resistências, respectivamente.

A rede de resistências térmicas é construída com base nos passos:

- Identificação dos nós associados à radiosidade de cada superfície;
- Ligar os nós um ao outro através das devidas resistências;
- Conectar aos os nós de radiosidade os poderes emissivos de corpo negro associados à temperatura de cada superfície.

A equação 2.25 expressa o balanço de radiação no nó de radiosidade da superfície  $i$ , onde a corrente que entra no nó deve ser igual a corrente que sai, ou seja, a taxa de transferência de radiação para a superfície  $i$  deve ser igual a taxa líquida de transferência de radiação de  $i$  para todas as outras superfícies. Ainda nessa equação cada componente pode ser representado por um elemento da rede, sendo  $(J_i - J_j)$  o potencial motriz e  $(A_i F_{ij})^{-1}$  uma resistência espacial ou geométrica. A figura 9 exemplifica a configuração do balanço de radiação em cada nó mostrando a situação no nó da superfície 1.



**Figura 9** - Balanço de radiação no nó referente à superfície 1.

## 2.5 Obtenção de dados experimentais

Para se realizar uma análise aprofundada de fenômenos físicos, afim de validar modelagens computacionais, é necessária a realização de experimentos que gerem os dados a serem utilizados nas análises.

No caso desse trabalho, foram usados resultados experimentais como entrada nas modelagens computacionais. Ou seja, os dados encontrados experimentalmente serviram de valores de entrada para o código proposto afim de, ao final, serem obtidos valores de taxas de transferência de calor.

Existem técnicas e métodos corretos para realizar tais experimentos, bem como a justificativa para tais procedimentos. Tais métodos estão descritos a seguir.

### 2.5.1. Medir

A necessidade de quantificar uma grandeza física a fim de caracterizar o objeto de estudo está atrelada a um procedimento experimental definido como medição (Albertazzi e Souza, 2008). Lord Kelvin, em uma das suas citações mais famosas, afirmou em 1883, que: “ *O conhecimento amplo e satisfatório sobre um processo ou um fenômeno somente existirá quando for possível medi-lo e expressá-lo por meio de números*”. Logo, se vê a importância da realização de medições experimentais para comprovar os modelos teóricos estudados.

Para realizar as medições e obter os resultados, é necessária a utilização de aparelhos e instrumentos que auxiliam na realização dos métodos experimentais. O nome designado aos dispositivos que compõem a galeria de aparatos que auxiliam a realização de experimentos é *sistema de medição* (Albertazzi e Souza, 2008).

Para que os resultados de um método experimental sejam satisfatórios é imprescindível que o experimento tenha um planejamento adequado, uma boa série de coleta de dados, que seja feita a quantificação dos fatores que possam vir a interferir nos valores a serem obtidos e que os resultados sejam tratados corretamente.

### 2.5.2 Erros de medição

Todo processo de medição, por mais cautelosa que seja a sua realização, está sujeito a erros. Sabendo-se disso, a questão está em como mitigar e mensurar esses erros para que se tenha um resultado final mais confiável.

O resultado numérico de um experimento tem pouco valor se não vier associado à sua indicação de incerteza. Conhecendo o grau de incerteza, pode-se saber quão rigoroso foi a realização do experimento e se é possível melhorar a sua precisão aumentando o número de medições, calibrando instrumentos ou mudando o método de medição.

O rigor que se pretende que a medição tenha depende do fim a que essa se destina. O aumento no grau de apuração dos equipamentos, no número de medições e no controle do ambiente implicam em maiores gastos com tempo e dinheiro. Por isso, é muito importante que o experimentador tenha noção do quão rigoroso deve ser o seu método.

Para realizar a análise de erros a primeira coisa que se deve saber é a sua classificação. As incertezas experimentais que podem ser determinadas através da múltipla repetição de uma medição e análise dos seus resultados são chamadas de erros aleatórios (Fonseca, 2004). Os erros aleatórios são inerentes ao processo de medição e se originam de flutuações imprevisíveis

nas condições ambientais, nos instrumentos de medida e na própria natureza humana do experimentador.

Já os erros sistemáticos ocorrem por motivos que podem ser determinados e, geralmente, corrigidos, como o uso de um instrumento mal calibrado ou com defeito, ou ainda o uso de um instrumento em condições inapropriadas. O experimentador deve evitar esse tipo de erro ou deve saber corrigir os dados experimentais de modo a eliminar seus efeitos.

No processo do tratamento de resultados experimentais obtidos, é recomendado utilizar técnicas desenvolvidas para minimizar os efeitos dos erros observados nos experimentos. Geralmente, são realizadas inúmeras experiências a fim de observar o comportamento de um determinado fenômeno. Isso torna mais fácil a determinação de erros, tanto os sistemáticos quanto os aleatórios (Albertazzi e Souza, 2008).

A determinação do valor total do erro associado pode ser realizada empregando a equação a seguir, onde estão discriminadas as parcelas de erros aleatórios, sistemáticos e totais:

$$E_{Total} = E_{Sist} + E_{Alea} \quad (2.24)$$

Essa equação demonstra em valores numéricos as parcelas de erro que estão associados a um valor mensurado. É importante que o erro total de um valor mensurado não seja alto, para que o processo de medição seja validado. Deseja-se que o valor final aferido ao erro associado seja minimizado ao máximo e para isso é necessário medir o valor de suas parcelas.

Para aferir o valor do erro sistemático, é imperativo conhecer a fundo os aparelhos de medição que serão utilizados nos experimentos, uma vez que esse erro está relacionado justamente a eles. Os outros fatores que compõe a parcela do erro sistemático devem ser corrigidos com aplicação de técnicas de calibração, melhoria dos métodos executados, etc. Aparelhos digitais, como os que foram utilizados para aferição das medidas nesse trabalho possuem em média, um erro de medição equivalente à metade do último algarismo significativo exibido pelo visor. Porém, a forma mais confiável de determinar tal medida é utilizar o valor indicado pelo manual de funcionamento do aparelho.

Para a determinação do valor do erro aleatório, é necessário utilizar conceitos estatísticos, uma vez que as causas dos mesmos são impossíveis de determinar e, conseqüentemente, de elimina-los no processo. Como citado anteriormente, para obter resultados provenientes de medições mais precisos, é ideal que se realizem inúmeras medições, repetindo, na medida do possível, as condições de operação.

Uma vez que são realizadas um número finito de medições, é feita uma análise inicial mais superficial onde são descartadas as medições mais destoantes. Em seguida, é aplicado um tratamento estatístico às medições selecionadas. Para determinar o melhor valor a ser adotado

como resultado das medições, utiliza-se a média aritmética dos valores aferidos, de acordo com a equação a seguir:

$$Valor_{Adotado} = Media\ Aritimetica = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum V_n \quad (2.25)$$

Em seguida, é determinado o valor do grau de incerteza associado a esse número finito de medições. O tratamento estatístico que estima o grau de incerteza associado as medições é denominado desvio padrão, e representa o valor em que determinado grupo de medições difere da medida aferida (média):

$$E_{Alea} = Desvio\ Padrao = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (2.26)$$

Assim, o valor adotado para as análises teóricas possui uma forma que leva em consideração todos os erros citados, associando as equações descritas nesse tópico. Deste modo, o formato dos valores resultantes das medições será:

$$Valor = (\bar{X} \pm E_{Total}) \quad (2.27)$$

Vale ressaltar que o valor adotado está inserido numa faixa de valores que compreendem a diferença entre a média aritmética e o erro total até o valor da média aritmética somada ao erro total.

### 2.5.3 Calibração

A avaliação do desempenho de um equipamento de medição é fundamental para a confiabilidade dos resultados medidos. A forma mais comum de caracterizar e avaliar esse desempenho é através da calibração.

Segundo o INMETRO, calibração pode ser definida como um conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões.

A calibração deve ser realizada como teste de aceitação quando novos equipamentos de medição são adquiridos e deve ser periodicamente refeita de acordo com o tempo de uso de cada instrumento. Isso porque, ao longo do seu tempo de uso, um equipamento de medição tende a ter seu desempenho degradado. Quanto mais o equipamento for utilizado, maior a chance que seu erro esteja acima do aceitável ou acima das especificações do fabricante.

As calibrações são usualmente realizadas por laboratórios de calibração e devem ocorrer de acordo com referências técnicas, tais como normas nacionais e internacionais, documentos orientativos do INMETRO e recomendações de fabricantes.

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

No ramo das ciências exatas, muitas vezes os modelos criados com base na fundamentação teórica e matemática precisam de comprovação física. Na natureza é comum eventos ocorrem de forma não planejada, se distanciando de modelos ideais. Por isso, se faz necessária a realização de experimentos que reproduzam os fenômenos estudados em ambientes controlados para que se possam tornar verdadeiras as hipóteses teóricas.

O presente capítulo tem como objetivo expor os conceitos teóricos utilizados na obtenção dos dados experimentais do trabalho. Vale ressaltar que os modelos, métodos e técnicas utilizados e descritos a seguir são baseados nas normas da ISO (*International Organization for Standardization*), sendo esta uma instituição que regula e padroniza os métodos e técnicas de medição.

#### 3.1 Materiais

Antes de falar dos métodos utilizados para a realização das medições experimentais, é necessário descrever os materiais utilizados nas análises, explicando seu funcionamento e suas propriedades.

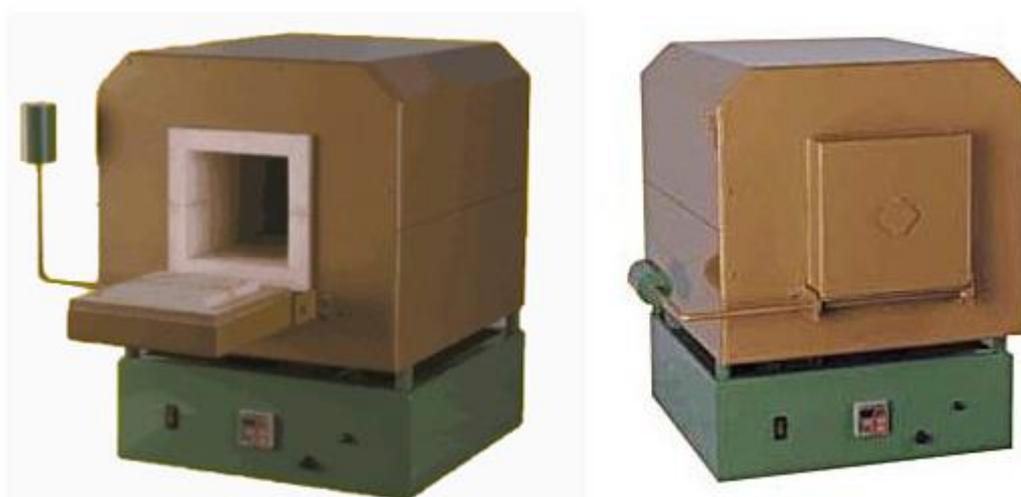
Os materiais utilizados foram: *termopares, multímetro e o forno mufla*. Todos esses materiais são do laboratório de materiais, com exceção dos sensores termopar que foram adquiridos pela dupla para a realização deste trabalho.

##### 3.1.1 Forno mufla

De acordo com o fabricante Fornitec, o forno tipo mufla F2 - DM Monofásico utilizado nesse ensaio possui características técnicas essenciais para análise do fenômeno de transferência de calor por radiação. O quadro seguir resume as principais características utilizadas na abordagem computacional.

**Quadro 1** - Dados do forno mufla. Fonte Fornitec.

Modelos	Tensão (V)	Temperatura (C°)	Potência (W)	Corrente (A)	Câmara Útil (A x L x P) (mm)
F1 - DM Monofásico	220	1200	2200	10	100x120x150
F2 - DM Monofásico	220	1200	4400	20	150x150x300
F2 - DM/T Trifásico	220	1200	4400	10	150x150x300
F3 - DM/T Trifásico	220	1200	6000	18	200x200x400

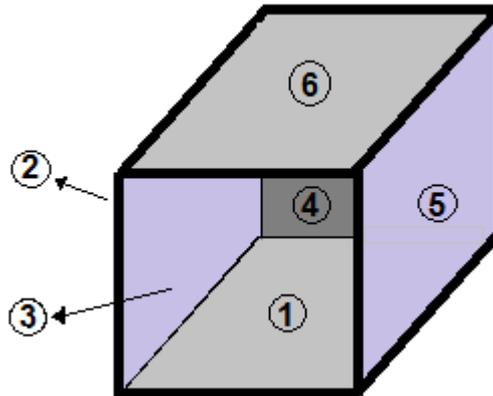
**Figura 10** - Forno mufla da marca Fornitec modelo F2 (Fornitec).

O formato da mufla, como citado anteriormente, é hexaédrico, ou seja, ele possui seis superfícies a serem analisadas. Conforme os valores cedidos pelo fabricante, as dimensões úteis desse forno são 15x15x30 cm. As espessuras de suas paredes possuem aproximadamente 2,5 cm.

Outro ponto importante para a análise é a temperatura que a mufla em questão pode aquecer as amostras inseridas em seu interior. De acordo com o fabricante, esse equipamento consegue atingir uma temperatura máxima de 1200° C. Essa temperatura é fornecida graças a resistências elétricas distribuídas em 4 de suas 6 superfícies. Para atingir essa temperatura o forno necessita de uma potência injetada baseada em seus valores nominais de tensão e corrente elétrica. Os valores nominais de operação são: tensão de 220 volts e 10 Amperes de corrente.

Por fim, o último detalhe que será levado em consideração para a realização desse estudo é o material de composição do forno. Segundo o fabricante, o equipamento em questão é feito basicamente de uma chapa de aço-carbono externa e de tijolo refratário em suas superfícies internas.

Para realizar o estudo da transferência de calor por radiação, foi necessária a identificação das superfícies do forno e dos modos como estão ligadas umas às outras, para o cálculo dos devidos fatores de forma. A base do forno foi denominada superfície 1, a superfície superior foi denominada superfície 6, a superfície na qual existe a abertura da mufla é denominada superfície 3, a que corresponde ao fundo é denominada superfície 4 e as laterais restantes são as superfícies 2 e 5. A figura 11 ilustra o modelo adotado.



**Figura 11** - Modelo da disposição das superfícies no forno.

No modelo descrito, as resistências elétricas se encontram na base do forno (superfície 1), nas paredes laterais (superfícies 2 e 5) e na parede superior (superfície 6). Esses dados serão aprofundados mais adiante. Para a melhor compreensão das informações apresentadas acima, o quadro abaixo foi confeccionado sintetizando as mesmas.

**Quadro 2** - Nome das superfícies do forno

Número Correspondente	Superfície
1	Base
2	Esquerda
3	Frente (porta)
4	Fundo
5	Direita
6	Teto

Conhecendo as medidas geométricas da mufla, é necessária a determinação do valor da emissividade do material utilizado. De acordo com Pertence (2004), a emissividade das

superfícies internas da mufla possui o valor de 0,75, uma vez que o material que reveste as paredes internas da mufla é o tijolo refratário. O valor adotado pode ser verificado no quadro 3 a seguir.

**Quadro 3** - Emissividade de alguns materiais. Fonte: Fluke.

<b>Material</b>	<b>Temp (°C)</b>	<b>Emissividade</b>
Alumínio (chapa comercial)	100	0,09
Alumínio (oxidado)	90 - 500	0,20 - 0,31
Latão (chapa laminada)	25	0,06
Latão (chapa oxidada a 600 °C)	200 - 600	0,61 - 0,69
Cobre (comercial)	25	0,07
Cobre (oxidado)	25	0,78
Cobre (aquecido a 600 °C)	200 - 600	0,57
Aço (inoxidável polido)	100	0,07
Ferro fundido (polido)	200	0,21
Aço inoxidável AISI 310 (altamente oxidado)	220 - 520	0,90 - 0,97
Aço carbono (tubo ou chapa novos)	25	0,66
Aço carbono ou baixa liga (oxidado a 600 °C)	200 - 600	0,80
Chapa de aço carbono (superfície áspera)	40 - 400	0,94 - 0,97
Tijolo refratário	1000	0,75
Tijolo refratário magnésítico	1000	0,38

Além das características já descritas do forno mufla, no período em que os testes deste trabalho foram realizados a mufla apresentava uma fenda na parede 1 de acordo com o que mostra a figura 23 mais a frente. Esta fenda é resultado de um procedimento malsucedido realizado por uma pessoa que possivelmente não conhecia o funcionamento do equipamento. Fato esse que exemplifica a justificativa deste trabalho.

### **3.1.2 Termopar Tipo K**

Nos diversos segmentos da engenharia o monitoramento da variável Temperatura é fundamental para a obtenção do produto final desejado. Um dos sensores mais utilizados para a medição de temperatura é o termopar. Ele é capaz de cobrir uma faixa bastante extensa de temperatura, variando entre -200 e 2300°C, com uma boa precisão e repetibilidade, além de se

sobressaírem na relação custo-benefício quando comparados a outros tipos de sensores de temperatura. Um termopar é mostrado na figura 12 a seguir.



**Figura 12** – Exemplo de termopar tipo K.

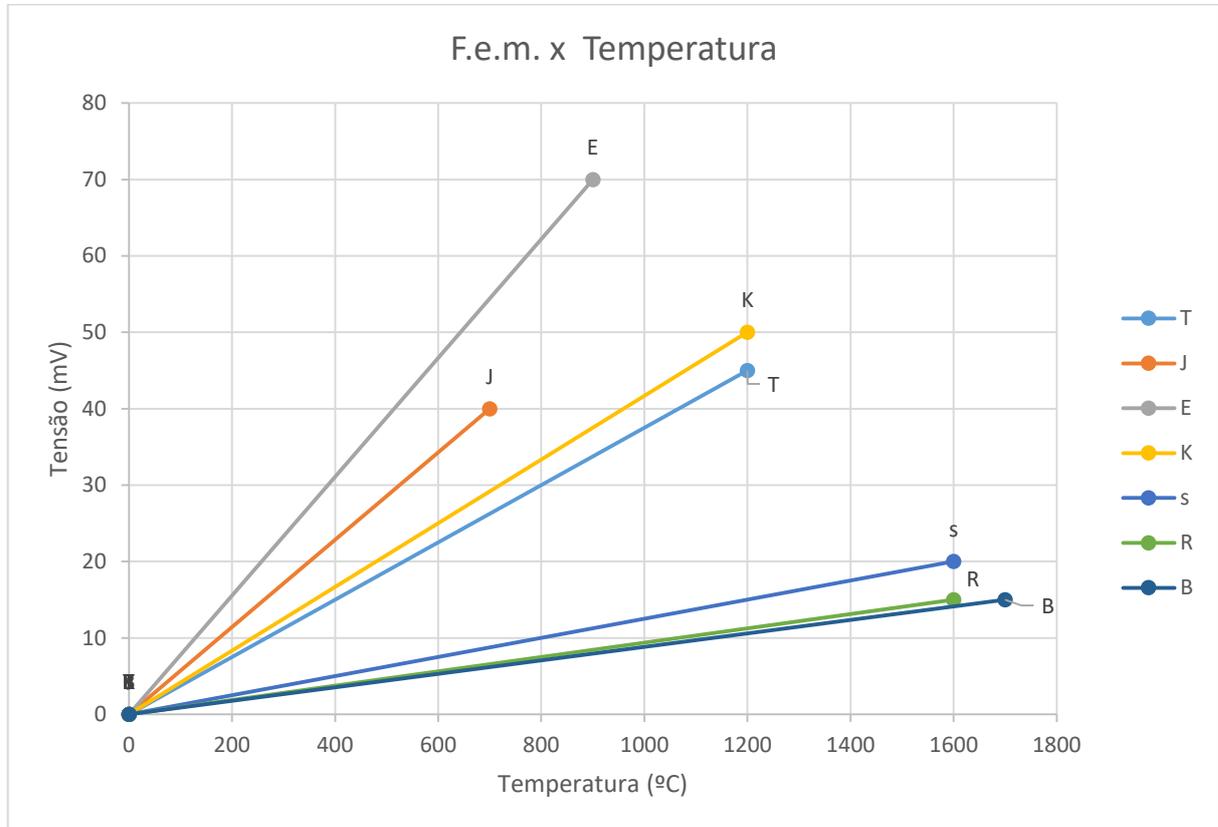
Um termopar consiste de dois condutores metálicos de origens diferentes. Os fios são soldados em um extremo ao qual se dá o nome de junção de medição, enquanto a outra extremidade, chamada de junção de referência, é levada ao instrumento medidor.

O aquecimento de dois metais distintos com temperaturas diferentes em suas extremidades resulta em uma força eletromotriz. Isso acontece porque a densidade de elétrons livres num metal, difere de um condutor para outro e depende da temperatura. Quando este circuito é interrompido, a tensão do circuito aberto torna-se uma função das temperaturas das junções e da composição dos dois metais. Este princípio conhecido como efeito Seebeck e é o que rege o funcionamento dos termopares (Termopares-1, 2006). A figura 13 mostra o efeito Seebeck no termopar.



**Figura 13** - Esquema de Junção para Termopar.

Conhecendo  $T_r$  e  $E_{AB}$  é possível determinar a temperatura  $T_m$ . A figura 14 mostra um gráfico da relação f.e.m. x temperatura para os tipos de termopares existentes no mercado.



**Figura 14** - Gráfico da relação f.e.m. x temperatura.

O tipo de termopar deve ser escolhido a partir das características da aplicação, como faixa de temperatura a ser medida, precisão necessária, custo e características do meio.

Cada tipo de termopar tem suas especificações e faixa de temperatura de trabalho. Conhecendo as características dos tipos de termopares e da aplicação realizada neste trabalho foi identificado o termopar do tipo K como melhor instrumento de medição da temperatura para o caso.

O termopar do tipo K é composto pelos metais Níquel-Cromo (fio positivo) e Níquel-Alumínio (fio negativo), sendo este último uma liga de níquel, alumínio, manganês e silício. A faixa de utilização deste termopar é de -200 a 1200 °C e a sua sensibilidade é de aproximadamente  $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

### 3.1.4 Multímetro

O multímetro é um aparelho digital utilizado para realizar medições de parâmetros de componentes de circuitos elétricos. Os modelos mais simples possuem basicamente voltímetros, que são medidores de tensão em um componente do circuito elétrico, e amperímetros, que são componentes que medem a corrente de um ramo do circuito elétrico. Ao passo que os modelos ficam mais complexos, eles passam a ter medidores de resistência elétrica, temperatura, teste de continuidade, etc.

Neste trabalho o multímetro foi utilizado para apresentar a diferença de potencial medida pelo termopar, para isso foi necessário que o modelo escolhido fosse capaz de ler valores na casa dos milivolts, já que o termopar apena apenas nessa faixa de voltagem.

O multímetro utilizado foi do modelo T M 108 da Techman. O manual de funcionamento com todas às especificações técnicas do aparelho garante que o erro associado é igual a metade da menor medida visualizada.



**Figura 15** – Multímetro T M 108.

### 3.2 Calibração dos sensores termopar

A calibração de termopares pode ser feita pelo método de comparação por meio de um sensor padrão de referência ou pelo método de pontos fixos, que podem ser pontos de fusão, solidificação ou pontos triplos de substâncias quimicamente puras. Existe ainda o método

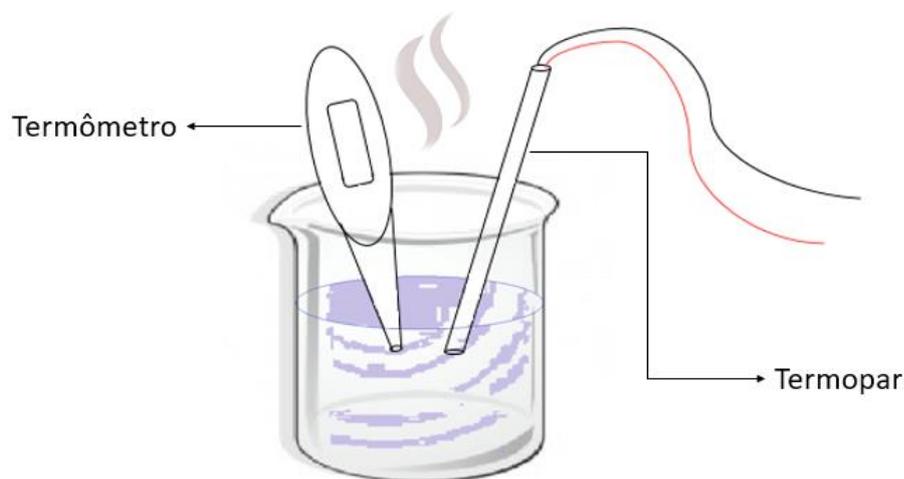
denominado calibração de termopares por ponte ou por fio. Este terceiro método é menos usual e é aplicado à calibração de termopares de metais nobres.

Neste trabalho os termopares foram calibrados por serem equipamentos novos, sendo necessária a calibração como teste de aceitação para sua utilização nas medições. O experimento para realizar a calibração dos sensores termopares foi realizado no dia 10/10/2016 no laboratório de química experimental localizado no *campus* FGA da Universidade de Brasília UNB.

Os materiais utilizados para a realização do mesmo foram:

- Um termômetro padrão, já calibrado, disponível no laboratório;
- Um béquer com gelo para realizar a junção dos termopares (0 °C);
- Outro béquer com água fervendo;
- Multímetro utilizado também para as medições realizadas no forno;
- Uma liga de cobre que tinha como função ser a junção dos terminais do sensor.

A calibração foi feita pelo método de comparação utilizando um termômetro como sensor padrão de referência e pelo método de pontos fixos, observando-se os pontos de ebulição da água. Assim, a água foi aquecida até que atingisse a sua temperatura de ebulição (100 °C), comparando-se os valores observados pelo multímetro com as tabelas fornecidas pelos fabricantes e analisando se a temperatura encontrada era condizente com a temperatura real da água e com a temperatura medida pelo termômetro. Esse método está representado na figura 16.



**Figura 16** - Esquema de calibração do termopar.

A realização da calibração dos termopares se deu no laboratório localizado na Faculdade Gama da Universidade de Brasília. No dia em que foi realizada a calibração, a temperatura ambiente era de 25°C, medida com o termômetro.



**Figura 17** - Temperatura medida no local dá realização do experimento de calibração.

Assim, correlacionando a temperatura com a tensão medida pelo multímetro e utilizando a tabela de conversão fornecida pelo fabricante do termopar (Anexo A), foi possível observar o funcionamento real do termopar, verificando-se a sua calibração. Às figuras a seguir mostram o processo de calibração do termopar.

É possível ver na primeira imagem a medição do multímetro em milivolts onde, de acordo com a tabela de termopares, o valor de 0,9 mV corresponde a 24°C. Também é mostrada a medição do termômetro digital no ponto onde foi realizada a junção dos terminais do termopar que, segundo o fabricante, deve estar próximo a 0° C para que a tabela de conversão seja válida.



**Figura 18** - Medição do multímetro em 0,9 mV; medição do termômetro em 0,8°C e a ponta do termopar em cima do multímetro medindo a temperatura ambiente.

Na imagem 19, o recipiente isolante foi preenchido com água congelada (0° C) onde foi colocada a junção dos terminais do termopar. A junção foi feita unindo-se os terminais com um fio de cobre puro em várias espiras, como é possível ver na imagem.



**Figura 19** - Junção dos terminais do termopar dentro de um recipiente isolante.

### 3.3 Medições

Como já dito anteriormente, a repetição de um experimento é essencial para a minimização de erros. Neste trabalho foram realizadas três medições da diferença de potencial no centro das seis paredes do forno mufla.

Duas superfícies que tenham as mesmas características térmicas e geométricas como área total, material de fabricação e localização no meio em relação às outras superfícies, tendem a ter um comportamento muito semelhante em relação à taxa de transferência de calor. Em condições normais, as paredes que ocupam os lados esquerda, direita, teto e base deveriam ter curvas de temperatura, radiossidade e transferência de calor parecidas, pois essas superfícies têm a mesma área, estão dispostas de forma semelhante geometricamente, apresentariam resistências de mesmo valor e seriam feitas do mesmo material, tendo o mesmo valor de emissividade.

A superfície da frente, por sua vez, tem a mesma área e emissividade da superfície do fundo e não tem geração de calor através de resistências, o que também acontece na parede do fundo. Em condições normais, as taxas de transferência de calor nessas duas superfícies também deveriam ser muito próximas.

Como relatado anteriormente, devido um incidente ocorrido com a mufla testada neste trabalho, durante o período em que ocorreram as medições a superfície da base continha uma fenda e resistência de potência maior que as das demais paredes, pois a resistência original havia queimado e não havia tempo suficiente para a sua devida substituição. Este fato resultou em uma série de desvios nos resultados deste estudo. Serão apresentados a seguir os resultados encontrados e suas devidas análises.

As medições foram realizadas, assim como o experimento de calibração dos sensores termopares, no Laboratório de Matérias localizado na Universidade de Brasília campus Gama, durante o período compreendido entre os dias 11/10/2016 a 04/11/2016. A temperatura medida nesse período pode ser observada no quadro a seguir. Os valores foram obtidos da mesma maneira que o valor de temperatura local foi obtido no dia da realização do experimento de calibração dos sensores.

**Quadro 4** - Temperaturas medias nos dias das medições.

Dia	10/out	11/out	12/out	13/out	14/out
<b>Temperatura</b>	<b>21°</b>	<b>22°</b>	-	<b>23°</b>	<b>22°</b>
Dia	17/out	18/out	19/out	20/out	21/out
<b>Temperatura</b>	<b>25°</b>	<b>24°</b>	<b>26°</b>	<b>22°</b>	<b>22°</b>
Dia	24/out	25/out	26/out	27/out	28/out
<b>Temperatura</b>	-	-	-	-	-
Dia	31/out	01/nov	02/nov	03/nov	04/nov
<b>Temperatura</b>	<b>22°</b>	<b>23°</b>	-	<b>23°</b>	<b>24°</b>
Dia	07/nov	08/nov	09/nov	10/nov	11/nov
<b>Temperatura</b>	-	<b>23°</b>	-	-	<b>26°</b>

Um detalhe que deve ser considerado é que na maioria dos dias nos quais foram realizadas as medições, só foi possível realizar uma medição por dia, uma vez que o forno possui uma baixa taxa de dispersão de calor, o que é o ideal para que seu funcionamento ocorra de acordo com o objetivo para o qual este foi projetado. O tempo de resfriamento do forno para que sua câmara interna atinja a temperatura ambiente após realizadas as medições é, em média, de quatro horas e meia. Com esse tempo médio, seria possível realizar pelo menos duas medições por dia, uma no período de manhã e outra no período da tarde, de acordo com o horário de funcionamento do laboratório. Porém, não existia exclusividade sobre o uso do forno, assim, outros graduandos o utilizavam, impossibilitando o reuso da mufla no mesmo dia.

O método utilizado para realizar os experimentos está descrito a seguir:

1. Foi inserida a ponta do sensor termopar pela abertura presente na parede frontal do forno mufla.
2. De acordo com a parede a ser analisada, o sensor foi curvado para que sua ponta tivesse contato direto com centro da parede a ser analisada. Para realizar a dobra do sensor termopar foi utilizado um alicate comum, disponível no laboratório e seu direcionamento foi realizado pelo método de tentativa e erro.
3. Os fios do sensor que se encontram em sua base, fora do forno, foram conectados por um enrolamento de cobre e imersos em um recipiente isolante preenchidos com gelo. Isso para garantir que a junção dos terminais do sensor estivessem a 0° C, uma das condições do fabricante para que os valores que foram observados no multímetro pudessem ser relacionados com as temperaturas.
4. À junção de cobre dos terminais foram acoplados dois cabos com ponta “jacaré” para que as informações obtidas pelos sensores pudessem ser visualizadas no multímetro. Logo, os cabos jacaré foram conectados ao multímetro.

5. Com isso, foi ajustado o cronometro digital disponível no laboratório e o forno foi ligado.
6. Foram realizadas medições de valores de tensão a cada vinte segundos. Calculou-se o tempo que a parede atingia  $300^{\circ}\text{C}$ , que de acordo com a tabela de conversão possui um valor aproximado de 12 mV e o tempo que o sensor da mufla indicava que a câmara atingia a mesma temperatura, desligando o aparelho.
7. Por fim, os resultados medidos em milivolts foram associados às temperaturas, medidas em graus Celsius.

As figuras a seguir foram obtidas no dia 24/10/2016 com a intenção de ilustrar os procedimentos descritos acima.



**Figura 20-** Reprodução do experimento de medição em condição inicial.



**Figura 21** – Reprodução do experimento de medição ao passo de 29 segundos.



**Figura 22** - Reprodução do experimento de medição ao passo de 121 segundos.



**Figura 23** - Identificação da falha na superfície 1.

Após passarem pelo tratamento estatístico, as medições realizadas foram sintetizadas em gráficos que demonstram como se dá o aumento da temperatura dentro do forno mufla. Na primeira análise, foram considerados os gráficos que mostram o aumento da tensão visualizada no multímetro em função do tempo, que pode ser observado a seguir.

O período analisado corresponde a 12 minutos e vinte segundos, ou 740 segundos, que em média era o tempo em que o sensor de temperatura do forno mufla entendia que o centro do forno atingia a temperatura de 300 °C e desligava sozinho a fim manter essa temperatura constante.

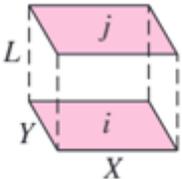
## 4. METODOLOGIA NUMÉRICA

Este capítulo tem como objetivo descrever os métodos utilizados para desenvolver o código numérico que foi capaz de resolver o problema deste trabalho de maneira computacional com o auxílio do software *MatLab 2016*, aplicando sobre o mesmo a teoria base para a solução de problemas que envolvam os fenômenos de transferência de calor.

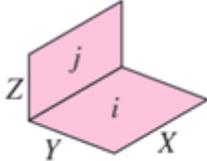
### 4.1 Cálculo da Radiosidade e do Fator de Forma

Para a realização desse estudo, os cálculos numéricos de Radiosidade e de Fator de Forma aplicam a formulação teórica apresentada na linguagem própria do software utilizado para a realização da análise numérica.

Os fatores de forma entre as superfícies foram calculados de acordo com as equações a seguir que levam em consideração a geometria hexaédrica do forno mufla e foram encontradas nas tabelas 12.1 da quarta edição do livro “*Transferência de Calor e de Massa – Uma Abordagem Prática*” de Yunus Çengel (2012). As equações são exibidas a seguir:

<p>Retângulos paralelos alinhados</p>  <p>O diagrama mostra dois retângulos paralelos, um superior (rotulado 'j') e um inferior (rotulado 'i'), alinhados horizontalmente. O comprimento comum dos dois retângulos é denotado por 'X'. A distância entre os centros dos dois retângulos é denotada por 'Y'. A largura dos retângulos é denotada por 'L'. Linhas tracejadas indicam a projeção dos retângulos no plano XY.</p>	$\bar{X} = X/L \text{ and } \bar{Y} = Y/L$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[ \frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} \right.$ $+ \bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}}$ $+ \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}}$ $\left. - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\}$
--	--

**Figura 24-** Fator de Forma Paralelo (Çengel, 2012).

<p>Retângulos perpendiculares com uma aresta em comum</p> 	$H = Z/X \text{ and } W = Y/X$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{\pi W} \left( W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} - (H^2 + W^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}} + \frac{1}{4} \ln \left\{ \frac{(1 + W^2)(1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \times \left[ \frac{W^2(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(W^2 + H^2)} \right]^{W^2} \times \left[ \frac{H^2(1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2)(H^2 + W^2)} \right]^{H^2} \right\} \right)$
---	---

**Figura 25** - Fator de Forma Perpendicular (Çengel, 2012)

Portanto, para o cálculo dos fatores de forma foi utilizado um sistema de equações com base nas relações algébricas mostradas nas imagens acima, inseridas no código numérico e comprovadas junto aos gráficos 1 e 2, apresentados junto aos resultados obtidos no capítulo 5 com seus respectivos valores destacados nas figuras.

#### 4.1.2 Cálculo da Radiosidade

Para o cálculo numérico das radiosidades, foi aplicada a formulação teórica descrita anteriormente. Basicamente foi utilizada a equação 2.16 onde, aplicada as seis superfícies do forno, foi possível chegar a um sistema de seis equações, que refletem o balanço de energia que é o objeto de estudo desse trabalho em função do método de redes de resistências térmicas:

$$\begin{aligned}
\frac{E_{b1} - J_1}{(1 - \varepsilon_1)/(\varepsilon_1 A_1)} &= \frac{J_1 - J_1}{1/(A_1 F_{12})} + \frac{J_1 - J_2}{1/(A_1 F_{12})} + \frac{J_1 - J_3}{1/(A_1 F_{13})} + \frac{J_1 - J_4}{1/(A_1 F_{14})} + \frac{J_1 - J_5}{1/(A_1 F_{15})} + \frac{J_1 - J_6}{1/(A_1 F_{16})} \\
\frac{E_{b2} - J_2}{(1 - \varepsilon_2)/(\varepsilon_2 A_2)} &= \frac{J_2 - J_1}{1/(A_2 F_{21})} + \frac{J_2 - J_2}{1/(A_2 F_{22})} + \frac{J_2 - J_3}{1/(A_2 F_{23})} + \frac{J_2 - J_4}{1/(A_2 F_{24})} + \frac{J_2 - J_5}{1/(A_2 F_{25})} + \frac{J_2 - J_6}{1/(A_2 F_{26})} \\
\frac{E_{b3} - J_3}{(1 - \varepsilon_3)/(\varepsilon_3 A_3)} &= \frac{J_3 - J_1}{1/(A_3 F_{31})} + \frac{J_3 - J_2}{1/(A_3 F_{32})} + \frac{J_3 - J_3}{1/(A_3 F_{33})} + \frac{J_3 - J_4}{1/(A_3 F_{34})} + \frac{J_3 - J_5}{1/(A_3 F_{35})} + \frac{J_3 - J_6}{1/(A_3 F_{36})} \\
\frac{E_{b4} - J_4}{(1 - \varepsilon_4)/(\varepsilon_4 A_4)} &= \frac{J_4 - J_1}{1/(A_4 F_{41})} + \frac{J_4 - J_2}{1/(A_4 F_{42})} + \frac{J_4 - J_3}{1/(A_4 F_{43})} + \frac{J_4 - J_4}{1/(A_4 F_{44})} + \frac{J_4 - J_5}{1/(A_4 F_{45})} + \frac{J_4 - J_6}{1/(A_4 F_{46})} \\
\frac{E_{b5} - J_5}{(1 - \varepsilon_5)/(\varepsilon_5 A_5)} &= \frac{J_5 - J_1}{1/(A_5 F_{51})} + \frac{J_5 - J_2}{1/(A_5 F_{52})} + \frac{J_5 - J_3}{1/(A_5 F_{53})} + \frac{J_5 - J_4}{1/(A_5 F_{54})} + \frac{J_5 - J_5}{1/(A_5 F_{55})} + \frac{J_5 - J_6}{1/(A_5 F_{56})} \\
\frac{E_{b6} - J_6}{(1 - \varepsilon_6)/(\varepsilon_6 A_6)} &= \frac{J_6 - J_1}{1/(A_6 F_{61})} + \frac{J_6 - J_2}{1/(A_6 F_{62})} + \frac{J_6 - J_3}{1/(A_6 F_{63})} + \frac{J_6 - J_4}{1/(A_6 F_{64})} + \frac{J_6 - J_5}{1/(A_6 F_{65})} + \frac{J_6 - J_6}{1/(A_6 F_{66})}
\end{aligned} \tag{4.1}$$

As equações acima podem ser rearranjadas colocando em evidência os  $J_i$ :

$$\begin{aligned}
a_{11}J_1 - \frac{1}{1/(A_1 F_{12})}J_2 - \frac{1}{1/(A_1 F_{13})}J_3 - \frac{1}{1/(A_1 F_{14})}J_4 - \frac{1}{1/(A_1 F_{15})}J_5 - \frac{1}{1/(A_1 F_{16})}J_6 &= \frac{E_{b1}}{(1 - \varepsilon_1)/(\varepsilon_1 A_1)} \\
-\frac{1}{1/(A_2 F_{21})}J_1 + a_{22}J_2 - \frac{1}{1/(A_2 F_{23})}J_3 - \frac{1}{1/(A_2 F_{24})}J_4 - \frac{1}{1/(A_2 F_{25})}J_5 - \frac{1}{1/(A_2 F_{26})}J_6 &= \frac{E_{b2}}{(1 - \varepsilon_2)/(\varepsilon_2 A_2)} \\
-\frac{1}{1/(A_3 F_{31})}J_1 - \frac{1}{1/(A_3 F_{32})}J_2 + a_{33}J_3 - \frac{1}{1/(A_3 F_{34})}J_4 - \frac{1}{1/(A_3 F_{35})}J_5 - \frac{1}{1/(A_3 F_{36})}J_6 &= \frac{E_{b3}}{(1 - \varepsilon_3)/(\varepsilon_3 A_3)} \\
-\frac{1}{1/(A_4 F_{41})}J_1 - \frac{1}{1/(A_4 F_{42})}J_2 - \frac{1}{1/(A_4 F_{43})}J_3 + a_{44}J_4 - \frac{1}{1/(A_4 F_{45})}J_5 - \frac{1}{1/(A_4 F_{46})}J_6 &= \frac{E_{b4}}{(1 - \varepsilon_4)/(\varepsilon_4 A_4)} \\
-\frac{1}{1/(A_5 F_{51})}J_1 - \frac{1}{1/(A_5 F_{52})}J_2 - \frac{1}{1/(A_5 F_{53})}J_3 - \frac{1}{1/(A_5 F_{54})}J_4 + a_{55}J_5 - \frac{1}{1/(A_5 F_{56})}J_6 &= \frac{E_{b5}}{(1 - \varepsilon_5)/(\varepsilon_5 A_5)} \\
-\frac{1}{1/(A_6 F_{61})}J_1 - \frac{1}{1/(A_6 F_{62})}J_2 - \frac{1}{1/(A_6 F_{63})}J_3 - \frac{1}{1/(A_6 F_{64})}J_4 - \frac{1}{1/(A_6 F_{65})}J_5 + a_{66}J_6 &= \frac{E_{b6}}{(1 - \varepsilon_6)/(\varepsilon_6 A_6)}
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Onde:

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \left[ \frac{1}{(1-\varepsilon_1)/(\varepsilon_1 A_1)} + \frac{1}{1/(A_1 F_{12})} + \frac{1}{1/(A_1 F_{13})} + \frac{1}{1/(A_1 F_{14})} + \frac{1}{1/(A_1 F_{15})} + \frac{1}{1/(A_1 F_{16})} \right] \\
a_{22} &= \left[ \frac{1}{1/(A_2 F_{21})} + \frac{1}{(1-\varepsilon_2)/(\varepsilon_2 A_2)} + \frac{1}{1/(A_2 F_{23})} + \frac{1}{1/(A_2 F_{24})} + \frac{1}{1/(A_2 F_{25})} + \frac{1}{1/(A_2 F_{26})} \right] \\
a_{33} &= \left[ \frac{1}{1/(A_3 F_{31})} + \frac{1}{1/(A_3 F_{32})} + \frac{1}{(1-\varepsilon_3)/(\varepsilon_3 A_3)} + \frac{1}{1/(A_3 F_{34})} + \frac{1}{1/(A_3 F_{35})} + \frac{1}{1/(A_3 F_{36})} \right] \\
a_{44} &= \left[ \frac{1}{1/(A_4 F_{41})} + \frac{1}{1/(A_4 F_{42})} + \frac{1}{1/(A_4 F_{43})} + \frac{1}{(1-\varepsilon_4)/(\varepsilon_4 A_4)} + \frac{1}{1/(A_4 F_{45})} + \frac{1}{1/(A_4 F_{46})} \right] \\
a_{55} &= \left[ \frac{1}{1/(A_5 F_{51})} + \frac{1}{1/(A_5 F_{52})} + \frac{1}{1/(A_5 F_{53})} + \frac{1}{1/(A_5 F_{54})} + \frac{1}{(1-\varepsilon_5)/(\varepsilon_5 A_5)} + \frac{1}{1/(A_5 F_{56})} \right] \\
a_{66} &= \left[ \frac{1}{1/(A_6 F_{61})} + \frac{1}{1/(A_6 F_{62})} + \frac{1}{1/(A_6 F_{63})} + \frac{1}{1/(A_6 F_{64})} + \frac{1}{1/(A_6 F_{65})} + \frac{1}{(1-\varepsilon_6)/(\varepsilon_6 A_6)} \right]
\end{aligned} \tag{4.3}$$

As equações podem ser arranjadas em uma matriz:

$$\begin{bmatrix}
a_{11} & -\frac{1}{1/(A_1 F_{12})} & -\frac{1}{1/(A_1 F_{13})} & -\frac{1}{1/(A_1 F_{14})} & -\frac{1}{1/(A_1 F_{15})} & -\frac{1}{1/(A_1 F_{16})} \\
-\frac{1}{1/(A_2 F_{21})} & a_{22} & -\frac{1}{1/(A_2 F_{23})} & -\frac{1}{1/(A_2 F_{24})} & -\frac{1}{1/(A_2 F_{25})} & -\frac{1}{1/(A_2 F_{26})} \\
-\frac{1}{1/(A_3 F_{31})} & -\frac{1}{1/(A_3 F_{32})} & a_{33} & -\frac{1}{1/(A_3 F_{34})} & -\frac{1}{1/(A_3 F_{35})} & -\frac{1}{1/(A_3 F_{36})} \\
-\frac{1}{1/(A_4 F_{41})} & -\frac{1}{1/(A_4 F_{42})} & -\frac{1}{1/(A_4 F_{43})} & a_{44} & -\frac{1}{1/(A_4 F_{45})} & -\frac{1}{1/(A_4 F_{46})} \\
-\frac{1}{1/(A_5 F_{51})} & -\frac{1}{1/(A_5 F_{52})} & -\frac{1}{1/(A_5 F_{53})} & -\frac{1}{1/(A_5 F_{54})} & a_{55} & -\frac{1}{1/(A_5 F_{56})} \\
-\frac{1}{1/(A_6 F_{61})} & -\frac{1}{1/(A_6 F_{62})} & -\frac{1}{1/(A_6 F_{63})} & -\frac{1}{1/(A_6 F_{64})} & -\frac{1}{1/(A_6 F_{65})} & a_{66}
\end{bmatrix}
\begin{pmatrix}
J_1 \\
J_2 \\
J_3 \\
J_4 \\
J_5 \\
J_6
\end{pmatrix}
=
\underbrace{\begin{pmatrix}
\frac{E_{b1}}{(1-\varepsilon_1)/(\varepsilon_1 A_1)} \\
\frac{E_{b2}}{(1-\varepsilon_2)/(\varepsilon_2 A_2)} \\
\frac{E_{b3}}{(1-\varepsilon_3)/(\varepsilon_3 A_3)} \\
\frac{E_{b4}}{(1-\varepsilon_4)/(\varepsilon_4 A_4)} \\
\frac{E_{b5}}{(1-\varepsilon_5)/(\varepsilon_5 A_5)} \\
\frac{E_{b6}}{(1-\varepsilon_6)/(\varepsilon_6 A_6)}
\end{pmatrix}}_B
\tag{4.4}$$

De forma mais compacta pode-se escrever  $AJ = B$ . Esta equação pode ser resolvida de forma direta no *MatLab* como:  $J = A \setminus B$ .

De forma genérica os termos de A podem ser calculados como:

- Os termos fora da diagonal, ou seja  $i \neq j$ , são calculados como  $a_{ij} = -A_i F_{ij}$ .

- Os termos na diagonal, para cada termo  $i$ :  $a_{ii} = \frac{\varepsilon_i A_i}{1 - \varepsilon_i} + \sum_{j=1}^n A_i F_{ij}$ , para  $F_{ii} = 0$ .
- Os termos independentes de  $J$ , para cada  $i$ :  $b_i = \frac{\varepsilon_i A_i}{1 - \varepsilon_i} E_{bi} = \frac{\varepsilon_i A_i}{1 - \varepsilon_i} \sigma T_{bi}^4$ .

### 4.1.3 Cálculo Numérico das Taxas de Transferência de Calor Por Radiação

Em posse dos valores de radiosidade é possível quantificar o valor das taxas de transferência de calor por radiação num regime permanente com a utilização da seguinte equação:

$$\dot{Q}_i = A_i \sum_{j=1}^N F_{ij} (J_i - J_j) \quad (4.5)$$

Esta equação é responsável por atribuir os valores às taxas de transferência de calor por radiação baseada nas relações referentes as suas respectivas radiosidades. Ela foi introduzida no código numérico criado para a esse estudo e forneceu os valores que serão expostos e analisados no capítulo a seguir.

## 4.2 Código Numérico

Para determinar os valores do fluxo de calor proveniente das superfícies do forno quando as mesmas atingiam as temperaturas aferidas experimentalmente com auxílio dos sensores termopares, foi confeccionado um código numérico para o software *MatLab 2016* com o intuito de se resolver os sistemas de equações mostrados anteriormente.

O código, apesar de ter linguagem simplificada, foi desenvolvido para que possa resolver de forma direta o fenômeno que este estudo aborda. É importante ressaltar que os valores inseridos no código são provenientes dos dados obtidos experimentalmente e da literatura utilizada como referência para esse estudo.

É possível observar o código utilizado para determinar as radiosidades de cada superfície do forno mufla analisado e as taxas de transferência de calor por radiação emitidas pelas mesmas no apêndice C.

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados a seguir foram obtidos, primeiramente a partir das medições experimentais realizadas junto ao forno mufla e, com posse das informações que serão expostas a seguir, foram

realizadas as devidas análises numéricas e analíticas. Estas foram realizadas utilizando como material de apoio a literatura indicada.

### **5.1 Análise Experimental**

Como já citado anteriormente no capítulo que descreve a metodologia empregada, o período de análise das temperaturas da mufla foi de 12 minutos e vinte segundos, ou 740 segundos, que em média era o tempo em que o sensor de temperatura do forno mufla entendia que o centro do forno atingia a temperatura de 300 ° C.

Com a utilização dos métodos indicados anteriormente, foi possível construir tabelas com as informações que expressam os valores desejáveis a se obter com as medições. O quadro a seguir contém as informações obtidas pela realização do experimento tomando como referência a parede da direita (parede 5). Para cada parede interna do forno foram realizadas três medições. Os quadros das outras paredes estão disponíveis no apêndice A.

Os valores medidos em mV foram obtidos de forma direta, enquanto os valores de média aritmética, desvio padrão e valor final foram obtidos com a aplicação das equações já comentadas anteriormente. Por fim, a conversão de temperatura foi realizada com o auxílio da tabela de conversão disponível no anexo A.

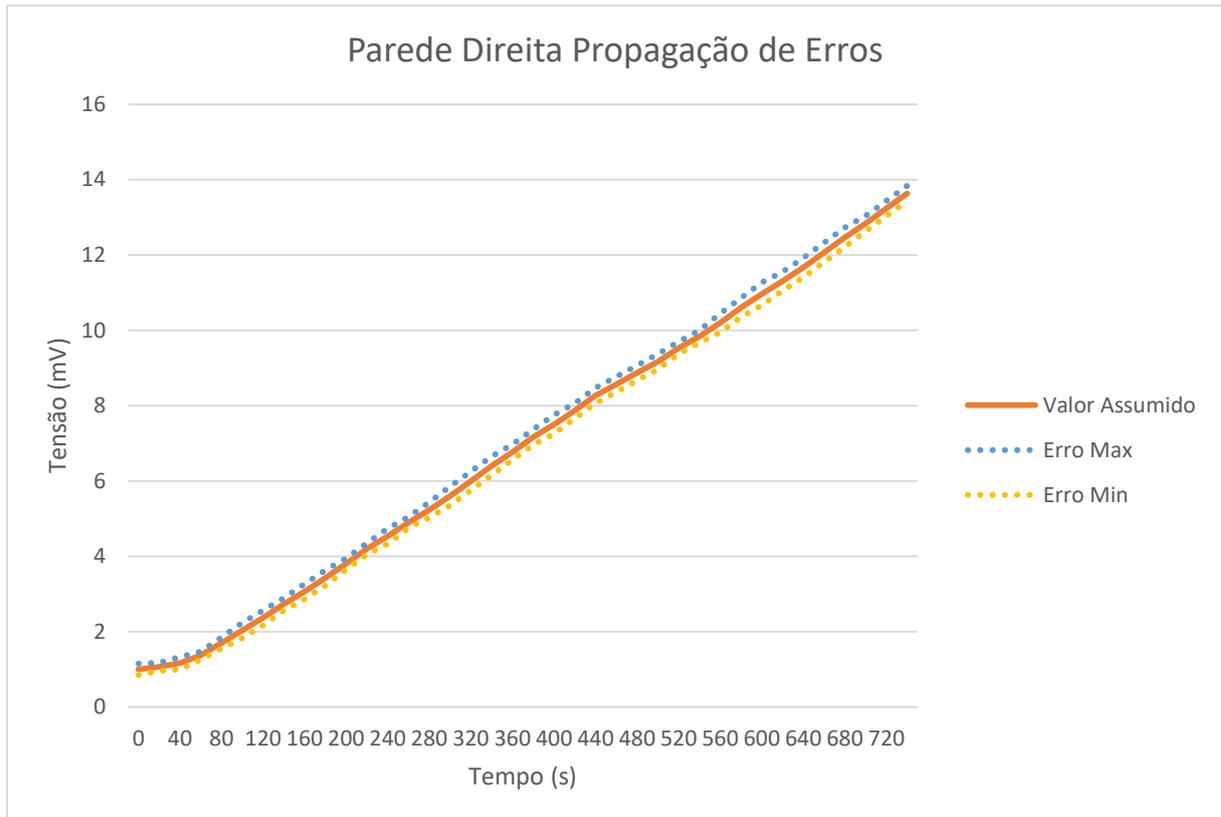
Os valores observados possuem entre si poucas variações, o que acarreta um desvio padrão com valores consideravelmente baixos. Esse mesmo comportamento pode ser observado quando se analisam as medições referentes as outras superfícies. Porém, a temperatura inicial observada para cada análise geralmente é inconstante. A esse fato se atribui-se os seguintes fatores:

1. Influência da temperatura ambiente observada no laboratório LEI;
2. As condições em que o forno se encontrava no horário das medições, lembrando que o uso do forno não foi exclusivo para realização desse estudo;
3. Fornecimento de energia elétrica para aquecimento das resistências térmicas, que são as fontes de calor do estudo;

Quadro 5 - Valores obtidos experimentalmente para a parede direita (5).

T(s)	Parede Direita 03/11/2016 (Manhã)	Parede Direita 03/11/2016 (Tarde)	Parede Direita 04/11/2016	TRATAMENTO ESTATISTICO				VALORES FINAIS
	Tensão (mV)	Tensão (mV)	Tensão (mV)	MEDIA	DESVIO	ERRO SISTEMATICO	ERRO TOTAL	TENSÃO ASSUMIDA (mV)
0	0,9	1,1	1	1	0,1	0,05	0,15	1,00±0,15
20	1	1,1	1,1	1,07	0,06	0,05	0,11	1,07±0,11
40	1,1	1,3	1,1	1,17	0,12	0,05	0,17	1,17±0,17
60	1,3	1,4	1,4	1,37	0,06	0,05	0,11	1,37±0,11
80	1,6	1,8	1,7	1,7	0,1	0,05	0,15	1,70±0,15
100	1,9	2,2	2	2,03	0,15	0,05	0,2	2,03±0,20
120	2,2	2,5	2,4	2,37	0,15	0,05	0,2	2,37±0,20
140	2,6	2,8	2,8	2,73	0,12	0,05	0,17	2,73±0,17
160	2,9	3,2	3,1	3,07	0,16	0,05	0,2	3,07±0,20
180	3,3	3,6	3,4	3,43	0,15	0,05	0,2	3,43±0,20
200	3,7	3,9	3,8	3,8	0,1	0,05	0,15	3,80±0,15
220	4,1	4,3	4,2	4,2	0,1	0,05	0,15	4,20±0,15
240	4,4	4,7	4,5	4,53	0,15	0,05	0,2	4,53±0,20
260	4,8	5	4,9	4,9	0,1	0,05	0,15	4,90±0,15
280	5,1	5,4	5,2	5,23	0,15	0,05	0,2	5,23±0,20
300	5,4	5,8	5,6	5,6	0,2	0,05	0,25	5,60±0,25
320	5,8	6,2	6	6	0,2	0,05	0,25	6,00±0,25
340	6,2	6,6	6,4	6,4	0,2	0,05	0,25	6,40±0,25
360	6,6	6,9	6,8	6,77	0,15	0,05	0,2	6,77±0,20
380	7	7,3	7,2	7,17	0,15	0,05	0,2	7,17±0,20
400	7,3	7,7	7,5	7,5	0,2	0,05	0,25	7,50±0,25
420	7,7	8	7,9	7,87	0,15	0,05	0,2	7,87±0,20
440	8,1	8,4	8,3	8,27	0,15	0,05	0,2	8,27±0,20
460	8,4	8,7	8,6	8,57	0,15	0,05	0,2	8,57±0,20
480	8,7	9	8,9	8,87	0,15	0,05	0,2	8,87±0,20
500	9	9,3	9,2	9,17	0,15	0,05	0,2	9,17±0,20
520	9,4	9,6	9,6	9,53	0,12	0,05	0,17	9,53±0,17
540	9,7	9,9	9,9	9,83	0,12	0,05	0,17	9,83±0,17
560	10	10,4	10,2	10,2	0,2	0,05	0,25	10,20±0,25
580	10,4	10,8	10,6	10,6	0,2	0,05	0,25	10,60±0,25
600	10,7	11,2	11	10,97	0,25	0,05	0,3	10,97±0,30
620	11,1	11,5	11,3	11,3	0,2	0,05	0,25	11,30±0,25
640	11,5	11,9	11,6	11,67	0,21	0,05	0,26	11,67±0,26
660	11,9	12,3	12	12,07	0,21	0,05	0,26	12,07±0,26
680	12,3	12,7	12,4	12,47	0,21	0,05	0,26	12,47±0,26
700	12,7	13	12,8	12,83	0,15	0,05	0,2	12,83±0,20
720	13,1	13,4	13,2	13,23	0,15	0,05	0,2	13,23±0,20
740	13,5	13,8	13,6	13,63	0,15	0,05	0,2	13,63±0,20

Para compreender melhor como se dá o comportamento das curvas de tensão medidas pelo sensor em função do tempo, foram plotados os gráficos dos valores obtidos considerando os valores medidos, seus erros máximos e seus erros mínimos. O gráfico abaixo sintetiza essas diferenças tomando como referência mais uma vez a superfície 5 (direita). Os gráficos de todas as superfícies encontram-se disponíveis para consulta no apêndice B.



**Figura 26** – Gráfico da propagação de erros da parede direita (5).

As análises referentes ao gráfico da figura 26 podem ser aplicadas aos gráficos das outras superfícies, disponíveis para consulta no Apêndice B. Desse gráfico, resultante das medições, é possível inferir que as medições realizadas, por serem executadas seguindo sempre a mesma metodologia experimental, possuem em sua totalidade pouca influência de erros atribuídos aos seus valores reais.

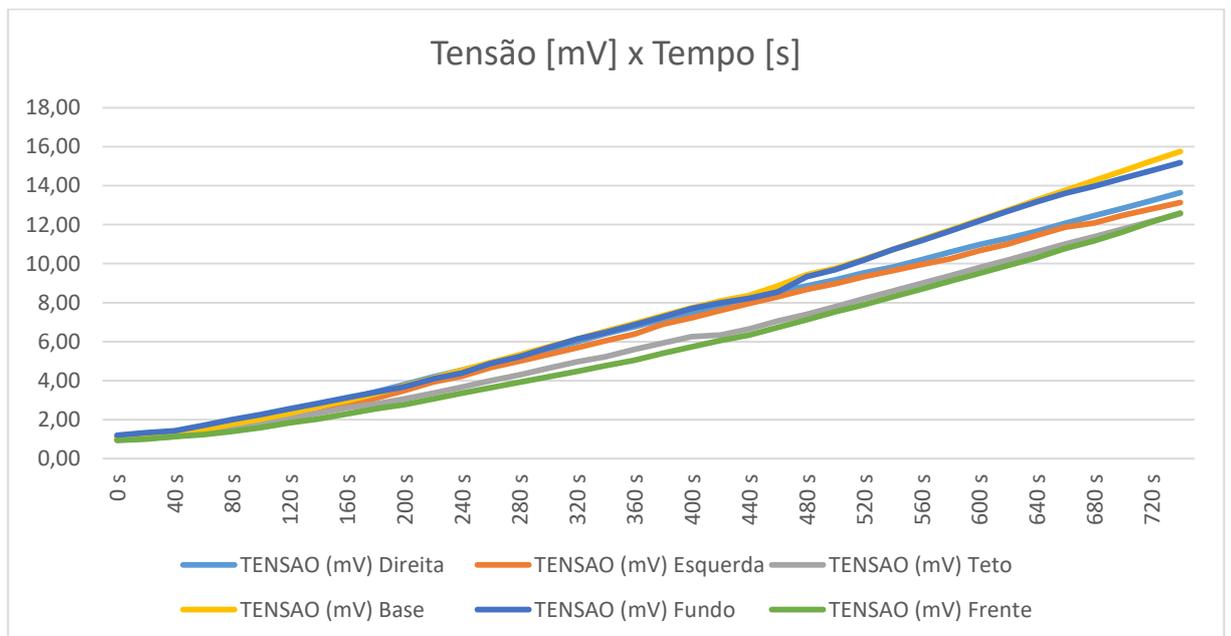
Antes de analisar os resultados obtidos, deve-se levar em consideração as seguintes informações:

1. O forno mufla possui em seu interior um sensor de temperatura que faz com que o forno desligue quando este atinge, em sua câmara interna, a temperatura designada no início do estudo. No estudo de caso analisado nesse trabalho a temperatura média da câmara interna foi definida como sendo 300° C°, porém, a

temperatura medida no centro das superfícies quando o forno desligava não era exatamente 300°.

2. Primeiro, vale ressaltar que as paredes 3 e 4, porta e fundo do forno, respectivamente, não possuem resistências elétricas que convertem energia elétrica em energia térmica (calor). Esse fato é observado analisando as medições das duas paredes.
3. O Tijolo refratário que constitui a superfície 1, a base do forno, possui uma falha que deixa a resistência elétrica exposta. Esse fato pode ser observado na figura a seguir e possui um impacto significativo nos resultados apresentados.

Realizadas as medições, foram plotados os gráficos de tensão e temperatura das superfícies e feitas as devidas análises. Estes estão expostos abaixo.



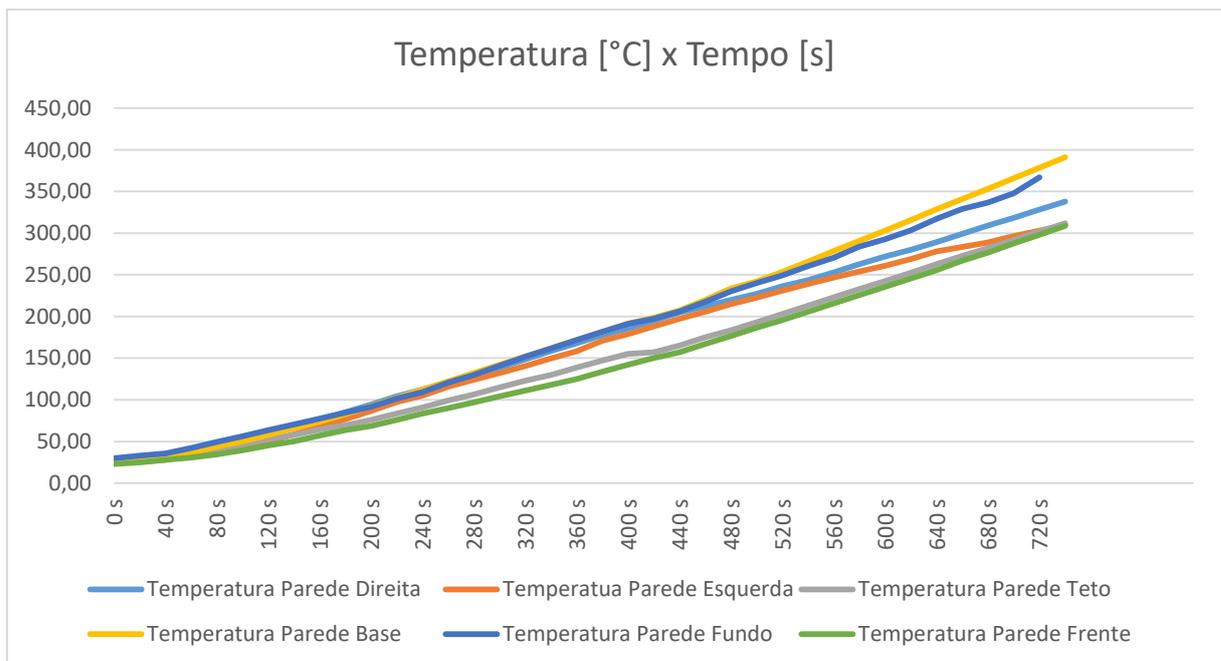
**Figura 27** - Gráfico Tensão (mV) x Tempo (s).

Analisando o gráfico acima é possível tirar algumas conclusões:

1. Os valores observados no multímetro aumentam de forma quase linear em função do tempo. Esse fato indica que o processo de aquecimento das superfícies do forno possui um padrão bem definido. Ao passo que o tempo avança, os valores observados no multímetro são acrescidos numa mesma proporção.
2. As curvas de crescimento possuem um comportamento muito parecido, uma vez que as paredes têm características físicas bem semelhantes.

3. A curva que representa os valores observados na base possui valores mais altos e crescimento mais rápido que as demais. Isso aconteceu provavelmente porque a resistência exposta nessa superfície fez com que ali houvesse uma maior concentração de calor e, conseqüentemente, os efeitos condutivos da transferência de calor para essa superfície são maiores que nas demais.
4. Pode-se inferir que por possuir uma área menor e estar em maior proximidade da resistência exposta na base do forno, a transferência de calor observada no fundo também seja mais intensa que nas demais superfícies.
5. As curvas que mais destoam do geral são as curvas referentes as paredes 3 e 6, que são as paredes da porta do forno e do teto do forno, respectivamente. O possível fato que justifica esse comportamento se deve a maior distância observada entre essas superfícies e a superfície que emite mais radiação devido a exposição da resistência e também ao fato de que a parede da frente não possui resistência elétrica como fonte de calor, ou seja, toda a energia térmica nessa superfície é proveniente da transferência de calor com as outras superfícies.

De maneira análoga a análise realizada anteriormente, foi gerado um gráfico que relaciona as temperaturas equivalentes aos valores medidos de tensão em função do tempo. Este gráfico pode ser observado abaixo.



**Figura 28** - Gráfico Temperatura (° C) x Tempo (s).

Algumas considerações referentes ao gráfico acima:

1. Como era de se esperar, as curvas observadas também possuem uma característica de aumento quase linear em função do tempo, já que os valores de temperatura são diretamente relacionados à tensão por um fator multiplicador.
2. Foi observado que a maior diferença entre as temperaturas se deu entre a parede da base e a parede da frente. Ao final dos 720 segundos a diferença entre as duas superfícies era de aproximadamente 82 °C.
3. No que tange os crescimentos das curvas, relacionadas aos fatores expostos, considerações relativas às análises feitas no gráfico da figura 27 são aplicáveis ao gráfico da figura 28.

Como citado anteriormente e com base nos dados expostos acima é possível notar que o comportamento esperado para esse estudo, que seria de um crescimento ao longo do tempo mais homogêneo e parecido dos valores das tensões elétricas medidas por meio dos sensores termopar para todas as superfícies e, conseqüentemente, os valores de temperatura bem próximos, não foi observado. Esse fato teve grande impacto nos valores obtidos para as radiosidades e, como será exposto, para os valores de taxas de transferências de calor entre as superfícies.

A essa constatação está atribuída, principalmente, a grande influência que a falha apresentada na superfície possui nos valores observados. A este fato está atrelado a condição pela qual se define a equação de transferência de calor por radiosidade. Tal fenômeno é descrito em função de parcelas referentes a geometria do objeto de estudo e pelo material do qual é fabricado.

A deformidade que é verificada na superfície 1 deixa exposta a resistência elétrica que fornece o trabalho convertido em calor pelo forno mufla. Tal componente é fabricado por um material metálico. Materiais metálicos apresentam como característica altos valores de condutividade térmica. Assim, a parcela quebrada de tijolo refratário que deixa visível a resistência metálica a uma temperatura muito mais elevada que a superfície do tijolo possui grande influência nos valores observados para as radiosidades de cada superfície, tendo conseqüentemente, grande impacto nos valores obtidos para as taxas de transferência de calor.

Por fim, para as análises que estão expostas a seguir, foram utilizados os dados do quadro 6 para todas as superfícies internas do forno mufla. Esses valores já são os valores finais, tratados por análise de erros. A validação de todos os modelos é baseada nos valores expostos a seguir:

**Quadro 6** - Resumo dos resultados experimentais obtidos.

<b>Parede</b>	<b>Temperatura observada quando o forno mufla atinge 300 °C (°C)</b>	<b>Tempo que a superfície atingiu a temperatura de 300 (s)</b>
Base (1)	390,95	599
Esquerda (2)	309,64	706
Porta (3)	308,09	723
Fundo (4)	377,76	600
Direita (5)	337,77	662
Teto (6)	311,07	719

É possível notar que apesar do forno mufla possuir um sensor interno que o desliga quando o mesmo percebe que seu interior como um todo atingiu os 300° C, as temperaturas observadas pelos sensores termopar nas medições realizadas possuem em alguns casos grande divergência uma das outras. Os possíveis motivos serão analisados nos capítulos a seguir.

## **5.2 Análise Numérica**

Os valores observados nesse tópico refletem os dados obtidos no código numérico criado computacionalmente e nos testes feitos em laboratório. Vale ressaltar que este estudo leva em consideração apenas o regime permanente de transferência de calor por radiação térmica em um forno mufla.

Nesse código foram transcritas as equações indicadas nos capítulos anteriores bem como os valores medidos experimentalmente afim de estudar os fenômenos de transferência de calor por radiação no interior do forno mufla.

É importante ressaltar que para esse estudo os efeitos condutivos e convectivos de transferência de calor não foram considerados, devido à grande complexidade desse tipo de análise.

### **5.2.1 Fatores de forma**

A partir do modelo analítico descrito anteriormente, foi possível adquirir os seguintes valores para os fatores de forma para o caso tridimensional da transferência de calor por radiação no forno mufla com o auxílio do software *MatLab 2016*:

**Quadro 7** - Fatores de forma obtidos numericamente.

<b>F<sub>ij</sub></b>	<b>F<sub>i1</sub></b>	<b>F<sub>i2</sub></b>	<b>F<sub>i3</sub></b>	<b>F<sub>i4</sub></b>	<b>F<sub>i5</sub></b>	<b>F<sub>i6</sub></b>
<b>F<sub>1j</sub></b>	0,0000	0,1164	0,2406	0,2406	0,1164	0,2858
<b>F<sub>2j</sub></b>	0,1164	0,0000	0,2406	0,2406	0,2858	0,1164
<b>F<sub>3j</sub></b>	0,2406	0,2406	0,0000	0,0685	0,2406	0,2406
<b>F<sub>4j</sub></b>	0,2406	0,2406	0,0685	0,0000	0,2406	0,2406
<b>F<sub>5j</sub></b>	0,1164	0,2858	0,2406	0,2406	0,0000	0,1164
<b>F<sub>6j</sub></b>	0,2858	0,1164	0,2406	0,2406	0,1164	0,0000

Alguns fatos que são necessários destacar acerca desse quadro:

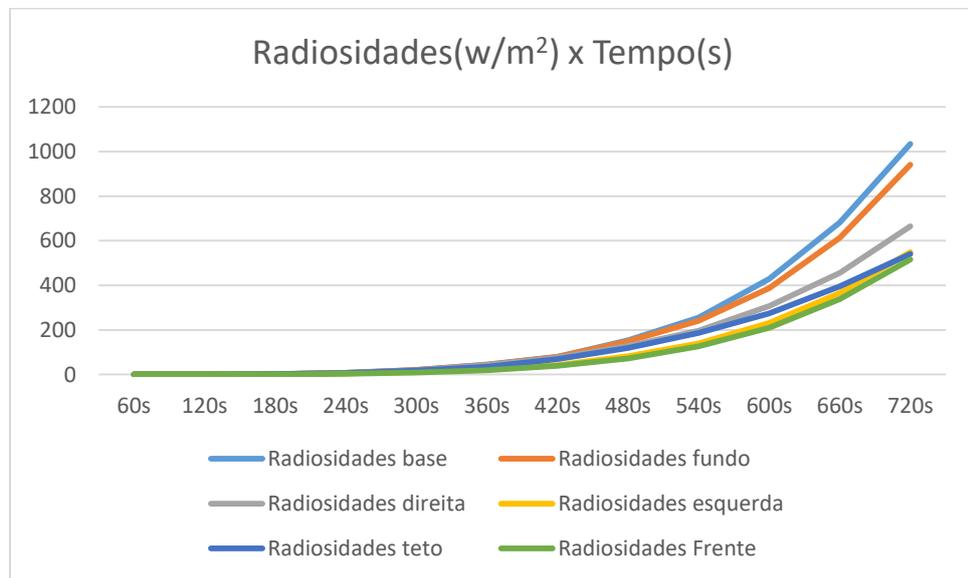
1. É possível observar a regra da soma nos valores obtidos, onde todos os valores em uma linha ou coluna quando somados resultam em 1.
2. Da mesma maneira, é possível identificar no quadro 7 a regra da reciprocidade, onde valores  $F_{ij} = F_{ji}$ .
3. Além de se verificar essas condições intrínsecas do parâmetro fator de forma, é possível observar que os valores do quadro 7 se organizam na tabela de forma simétrica, onde:
  - a. Na diagonal principal, se obtém o valor nulo, referente ao fator de forma de uma superfície sobre ela mesma.
  - b. Na diagonal secundaria é verificado o valor referente aos fatores de forma relacionados as situações de superfícies paralelas. Essa arrumação na tabela se deve ao fato da geometria hexaédrica do forno mufla.
  - c. Os demais fatores são referentes as parcelas perpendiculares referentes a cada superfície.

### 5.2.2. Radiosidades J

Mais uma vez, foi realizada uma transposição das equações previamente citadas para o código numérico e a partir desse processo se fez possível obter os valores referentes à radiosidade de cada parede do forno utilizando como parâmetro de entrada as temperaturas medidas experimentalmente para quando o forno mufla atinge a temperatura de 300 °C. Os dados obtidos através do código numérico estão expostos no quadro 8. É exposto também o gráfico radiosidade x tempo na figura 29 onde se observa o comportamento das curvas de radiosidade nas seis paredes da mufla.

**Quadro 8** - Radiosidades obtidas numericamente para as temperaturas finais observadas.

Radiosidades ( $J_{\text{parede}}$ )	Rasiodidades ( $W/m^2$ )
$J_1$ base	1175,6
$J_2$ esquerda	595,4
$J_3$ frente	585,5
$J_4$ fundo	1055,6
$J_5$ direita	747,1
$J_6$ teto	620,1

**Figura 29** - Gráfico Radiosidades (J) x Tempo (t).

Após se destacar esse ponto tão impactante na análise, algumas afirmações são inferidas com base no gráfico 29 que demonstra o crescimento das taxas de radiosidades durante o tempo de análise e no quadro 8 que apresenta os valores para as temperaturas finais adotadas:

1. Os valores finais escritos no quadro 8 que correspondem aos valores observados para as superfícies 2, 3 e 6 são algarismos próximos, algo que pode se justificar pelo fato da influência da fenda no tijolo refratário da superfície 1 sobre essas superfícies ser menor que nas demais.
2. O maior valor observado está relacionado a superfície 1, que é a base do forno. O fato da resistência elétrica estar exposta nessa superfície implica que a mesma atinja uma maior temperatura final e conseqüentemente um valor para radiosidade superior as demais superfícies.

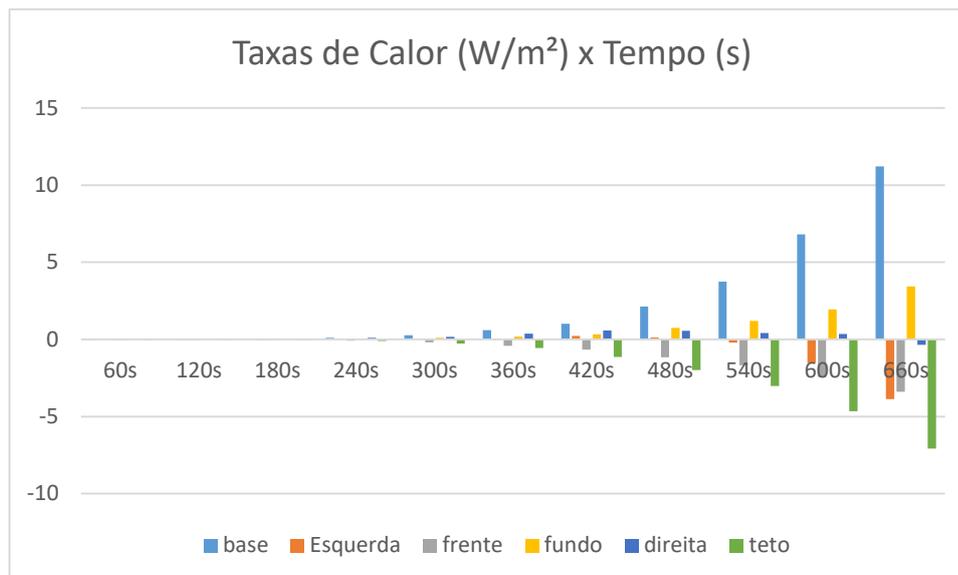
3. De maneira análoga, o menor valor observado está relacionado a superfície que também possui o menor valor medido, ou seja, a superfície 3 do forno ou a porta do mesmo. Para esta superfície, além de não possuir em seu interior uma fonte de calor baseada em resistências elétricas, ela é a que se encontra geograficamente mais distante do fator causador de tanta disparidade no estudo.
4. Observa-se que todas as curvas têm um aumento considerável a partir de mesmo ponto, onde  $t$  é aproximadamente 360 segundos. Infere-se que a partir desse ponto, os efeitos da transferência de calor por radiação começam a ter mais influência sobre as temperaturas observadas nas superfícies internas do forno.

### 5.2.3. Taxas de Transferência de Calor $q$

A partir dos valores das radiosidades das superfícies foi possível calcular as taxas de transferência de calor ( $q$ ). Os valores finais estão exibidos na tabela abaixo e as curvas do comportamento das taxas de cada superfície estão apresentadas no gráfico da imagem 30.

**Quadro 9** - Taxas de transferência de calor finais.

<b>Taxas (<math>q_{\text{parede}}</math>)</b>	<b>Fluxo (<math>\text{W/m}^2</math>)</b>
Q1 base	20,11
Q2 esquerda	-10,93
Q3 frente	-5,04
Q4 fundo	6,62
Q5 direita	-1,22
Q6 teto	-12,04



**Figura 30** – Gráfico taxa de transferência de calor x tempo.

Pode-se concluir, analisando o quadro e o gráfico apresentados acima que:

1. A quantidade de energia emitida está intimamente ligada à temperatura da superfície, uma vez que se uma superfície é capaz de irradiar calor ela necessariamente também absorve calor.
2. Qualquer superfície do forno é capaz de trocar calor com todas as superfícies que estão à sua frente, a superfície 1, por exemplo, troca calor com as superfícies 2,3,4,5 e 6. O mesmo acontece com todas as outras.
3. As superfícies do teto (6) e da frente (3) apresentaram taxa de transferência de calor negativa durante boa parte da análise. Pode-se inferir que estas superfícies, no balanço energético referente as taxas, receberam mais quantidades de calor do que emitiram.
4. A superfície esquerda (5) e superfície direita (6) tiveram a taxa de transferência de calor bem próxima do zero em grande parte do processo de aquecimento e após 540 segundos a taxa da parede esquerda atingiu valores negativos, acontecendo o mesmo com a parede do fundo a altura dos 600 segundos.
5. As superfícies do fundo (4) e a base (1) apresentaram valores positivos durante um grande período no processo, destacando-se a taxa de transferência de calor da parede da base (1), que se mostrou muito maior que as outras atingindo um valor de 11,22 ( $w/m^2$ ) ao fim dos 660 segundos.
6. Os valores negativos aparecem quando a superfície recebe mais calor do que emite.

## 6. CONCLUSÃO

O cálculo completo da transferência de calor em um forno mufla é bem complexo e trabalhoso, pois envolve a geometria do forno, potência emissiva, irradiação, radiosidade, emissividade, material de fabricação, diferença de temperaturas, entre outros elementos. Tantos parâmetros a serem analisados tornam inviável a realização desse cálculo através de soluções analíticas. Para resolver problemas como este existem diversas ferramentas de cálculo numérico que facilitam a obtenção dos resultados e poupam tempo. Este trabalho propõe e valida uma metodologia numérica implementada no software *MatLab* 2016 para realizar um estudo da transferência de calor que ocorre no funcionamento de um forno mufla.

A transferência de calor por radiação térmica é o modo de transferência de calor mais relevante quando analisado um sistema onde o meio é um forno, sendo responsável por mais de 90% da troca de energia térmica. Neste trabalho o cálculo da taxa de radiação foi feito por meio do fator de forma e de uma rede de resistências térmicas e para validar o modelo proposto foram realizados vários testes com um forno mufla disponível na UnB.

Foi observado principalmente que o problema presente em uma das paredes da mufla durante as realizações dos testes interferiu significativamente nos resultados obtidos, causando alterações nos padrões de transferência de calor por radiação esperados, e conseqüentemente no modo em que as temperaturas aumentaram causando uma diminuição no período que o forno atinge a temperatura desejada.

Apesar da resistência elétrica ser composta por um material metálico que, conforme a tabela 2, tem em média uma emissividade menor que a do tijolo refratário, esse tipo de material possui uma condutividade térmica elevadíssima, o que o confere um acréscimo de temperatura na sua superfície maior que a temperatura que é medida na superfície do tijolo refratário, uma vez que a energia convertida em calor na resistência elétrica, por meio de efeito joule, é muito maior que a energia transferida às superfícies de tijolo refratário provenientes da condução e radiação térmica a que estas estão submetidas.

É difícil ter convicção de como se daria comportamento desse forno se todas as paredes possuíssem um acabamento homogêneo, uma vez que, como verificado nesse trabalho, um fator pode ter um impacto enorme nos resultados medidos. Pode-se apenas, baseado na literatura, inferir que provavelmente os valores resultantes das análises experimentais possuiriam um comportamento mais nivelado num mesmo patamar.

Deve-se considerar também, que apesar da condição da resistência elétrica estar exposta em uma das superfícies ser, de fato, o principal fator para que os valores obtidos

experimentalmente estejam indicando resultados um pouco fora do intervalo esperado para esse estudo, outros fatores podem ter tido também certa influência, por exemplo: a má calibração dos aparelhos utilizados nas medições; os agentes responsáveis pelas medições não as realizarem de maneira ideal para tal tipo de experimento; as condições criadas para que o experimento pudesse ser realizado não eram as ideais; etc.

Para trabalhos futuros, sugere-se uma modelagem mais complexa para o forno, baseada nos conceitos utilizados no Trabalho de Conclusão de Curso 1, tais como:

- A inserção de malhas numéricas para discretizar o forno, mas agora utilizando o conceito em três dimensões, para que seja possível estudar com maior complexidade os fenômenos relacionados a transferência de calor;
- A inclusão das parcelas de condução e convecção no cálculo numérico;

E a realização de análises mais complexas aprimorando os métodos aqui apresentados, realizando:

- A obtenção mais aprimorada de valores experimentais, realizando um maior número de medições;
- Utilização de equipamentos mais precisos nas medições;
- A utilização de mais de um sensor termopar dentro do forno, se possível, para comparar em tempo real as diferenças de temperatura nas superfícies.



## REFERENCIAL BIBLIOGRAFICO

B. R. BALIGA, S. V. PATANKAR: **A new finite-element formulation for convection diffusion problems** ,Numerical Heat Transfer, vol. 3, pp. 393–409, 1980

ÇENGEL, Yunus A. **Transferência de Calor e Massa** – Uma Abordagem Prática. Vol. 4ª edição. Bookman, 2012.

FONTAINE, Jonathan L. Nutzati. **Computing Radiation Exchange**. Daytona Beach: Embry-riddle Aeronautical University, 2013.

IBRAHIM, Umami Kalthum; SALLEH, Ruzitah Mohd. **Application of Network Representation Model for Radiation Analysis**. Selangor, Malaysia: Universiti Teknologi Mara, 2012.

INCROPERA, Frank P., David P. DEWITT, Theodore L. Bergman, e Adrienne S. Lavine. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Vol. 6ª edição. LTC, 2008

KHOR, Yong Kang; HUNG, Yew Mun; LIM, Boon Kian. On the role of radiation view factor in thermal performance of straight-fin heat sinks. Malasia: Elsevier, 2010.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**, Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 2ª Edição Revista e Ampliada, 2004

PERTENCE NETO, Argemiro. **Noções sobre termografia**: Curso: Inspeção de Equipamentos e Instalações Petrobrás / UN-Rio. Rio de Janeiro: Cooperativa dos Profissionais de Engenharia em Integridade de Equipamentos Ltda., 2004. 6 p.

**APENDICES**

**APENDICE A:** O presente apêndice apresenta os quadros contendo as medições realizadas bem como os valores calculados para seus erros associados que foram obtidos a partir das medições experimentais realizadas.

Quadro 7 - Valores obtidos experimentalmente para a parede esquerda (2)

T(s)	Parede Esquerda 11/10/2016	Parede Esquerda 13/10/2016	Parede Esquerda 14/10/2016	TRATAMENTO ESTATISTICO				VALORES FINAIS
	Tensão (mV)	Tensão (mV)	Tensão (mV)	MEDIA	DESVIO	ERRO SISTEMATICO	ERRO TOTAL	TENSÃO ASSUMIDA (mV)
0	0,8	1,1	1	<b>0,97</b>	0,15	0,05	0,20	<b>0,97±0,20</b>
20	0,8	1,2	1,1	<b>1,03</b>	0,21	0,05	0,26	<b>1,03±0,26</b>
40	0,8	1,3	1,3	<b>1,13</b>	0,29	0,05	0,34	<b>1,13±0,29</b>
60	1	1,5	1,6	<b>1,37</b>	0,32	0,05	0,37	<b>1,37±0,37</b>
80	1,1	1,7	1,8	<b>1,53</b>	0,38	0,05	0,43	<b>1,53±0,43</b>
100	1,4	1,9	2,1	<b>1,80</b>	0,36	0,05	0,41	<b>1,80±0,41</b>
120	1,7	2,1	2,3	<b>2,03</b>	0,31	0,05	0,36	<b>2,03±0,36</b>
140	2,1	2,4	2,6	<b>2,37</b>	0,25	0,05	0,30	<b>2,37±0,30</b>
160	2,6	2,7	2,9	<b>2,73</b>	0,15	0,05	0,20	<b>2,73±0,20</b>
180	3	3	3,3	<b>3,10</b>	0,17	0,05	0,22	<b>3,10±0,22</b>
200	3,4	3,4	3,7	<b>3,50</b>	0,17	0,05	0,22	<b>3,50±0,22</b>
220	3,9	3,8	4,1	<b>3,93</b>	0,15	0,05	0,20	<b>3,93±0,20</b>
240	4,2	4,1	4,4	<b>4,23</b>	0,15	0,05	0,20	<b>4,23±0,20</b>
260	4,5	4,5	4,6	<b>4,67</b>	0,21	0,05	0,26	<b>4,67±0,26</b>
280	4,9	4,8	4,9	<b>5,00</b>	0,26	0,05	0,31	<b>5,00±0,31</b>
300	5,3	5,1	5,2	<b>5,34</b>	0,32	0,05	0,37	<b>5,34±0,37</b>
320	5,7	5,4	5,5	<b>5,68</b>	0,37	0,05	0,42	<b>5,68±0,42</b>
340	6,1	5,8	5,8	<b>6,05</b>	0,39	0,05	0,44	<b>6,05±0,44</b>
360	6,5	6,1	6,2	<b>6,39</b>	0,45	0,05	0,50	<b>6,39±0,50</b>
380	6,9	6,5	6,5	<b>6,89</b>	0,70	0,05	0,75	<b>6,89±0,75</b>
400	7,3	6,8	6,8	<b>7,23</b>	0,76	0,05	0,81	<b>7,23±0,81</b>
420	7,7	7,1	7,1	<b>7,60</b>	0,87	0,05	0,92	<b>7,60±0,92</b>
440	8,1	7,5	7,4	<b>7,97</b>	0,90	0,05	0,95	<b>7,97±0,95</b>
460	8,6	7,8	7,7	<b>8,30</b>	0,95	0,05	1,00	<b>8,30±1,00</b>
480	9,0	8,2	8,0	<b>8,67</b>	0,98	0,05	1,03	<b>8,67±1,03</b>
500	9,4	8,5	8,3	<b>8,98</b>	0,98	0,05	1,03	<b>8,98±1,03</b>
520	9,8	8,8	8,6	<b>9,33</b>	1,02	0,05	1,07	<b>9,33±1,07</b>
540	10,1	9,2	9,0	<b>9,64</b>	1,01	0,05	1,06	<b>9,64±1,06</b>
560	10,5	9,5	9,3	<b>9,96</b>	0,99	0,05	1,04	<b>9,96±1,04</b>
580	10,8	9,9	9,6	<b>10,24</b>	0,92	0,05	0,97	<b>10,24±0,97</b>
600	11,1	10,2	9,9	<b>10,53</b>	0,86	0,05	0,91	<b>10,53±0,91</b>
620	11,3	10,5	10,2	<b>10,84</b>	0,84	0,05	0,89	<b>10,84±0,89</b>
640	11,5	10,9	10,5	<b>11,23</b>	0,95	0,05	1,00	<b>11,23±1,00</b>
660	11,8	11,2	10,8	<b>11,44</b>	0,77	0,05	0,82	<b>11,44±0,82</b>
680	12,3	11,6	11,1	<b>11,66</b>	0,59	0,05	0,64	<b>11,66±0,64</b>
700	12,3	11,9	11,4	<b>11,88</b>	0,69	0,05	0,74	<b>11,88±0,74</b>
720	12,8	12,2	11,8	<b>12,26</b>	0,52	0,05	0,57	<b>12,26±0,57</b>
740	13,1	12,6	12,1	<b>12,48</b>	0,38	0,05	0,43	<b>12,48±0,43</b>

Quadro 8 - Valores obtidos experimentalmente para a parede Teto (6)

T(s)	Parede Teto 17/10/2016	Parede Teto 18/10/2016	Parede Teto 19/10/2016	TRATAMENTO ESTATISTICO				VALORES FINAIS
	Tensão (mV)	Tensão (mV)	Tensão (mV)	MEDIA	DESVIO	ERRO SISTEMATICO	ERRO TOTAL	TENSÃO ASSUMIDA (mV)
0	1,20	1,10	1,20	<b>1,17</b>	0,06	0,05	0,11	<b>1,17±0,11</b>
20	1,20	1,20	1,30	<b>1,23</b>	0,06	0,05	0,11	<b>1,23±0,11</b>
40	1,30	1,30	1,30	<b>1,30</b>	0,00	0,05	0,05	<b>1,30±0,05</b>
60	1,40	1,50	1,60	<b>1,50</b>	0,00	0,05	0,05	<b>1,50±0,05</b>
80	1,60	1,70	1,60	<b>1,63</b>	0,06	0,05	0,11	<b>1,63±0,11</b>
100	1,80	1,80	2,00	<b>1,87</b>	0,12	0,05	0,17	<b>1,87±0,17</b>
120	2,00	2,10	2,30	<b>2,13</b>	0,15	0,05	0,20	<b>2,13±0,20</b>
140	2,20	2,30	2,50	<b>2,33</b>	0,15	0,05	0,20	<b>2,33±0,20</b>
160	2,40	2,60	2,80	<b>2,60</b>	0,20	0,05	0,25	<b>2,60±0,25</b>
180	2,50	2,90	3,00	<b>2,80</b>	0,26	0,05	0,31	<b>2,80±0,31</b>
200	2,70	3,20	3,30	<b>3,07</b>	0,32	0,05	0,37	<b>3,07±0,37</b>
220	3,00	3,50	3,60	<b>3,37</b>	0,32	0,05	0,37	<b>3,37±0,37</b>
240	3,30	3,80	3,90	<b>3,67</b>	0,32	0,05	0,37	<b>3,67±0,37</b>
260	3,60	4,20	4,20	<b>4,00</b>	0,35	0,05	0,40	<b>4,00±0,40</b>
280	3,90	4,50	4,50	<b>4,30</b>	0,35	0,05	0,40	<b>4,30±0,40</b>
300	4,20	4,80	4,90	<b>4,63</b>	0,38	0,05	0,43	<b>4,63±0,43</b>
320	4,50	5,10	5,30	<b>4,97</b>	0,42	0,05	0,47	<b>4,97±0,47</b>
340	4,80	5,30	5,60	<b>5,23</b>	0,40	0,05	0,45	<b>5,23±0,45</b>
360	5,10	5,70	6,00	<b>5,60</b>	0,46	0,05	0,51	<b>5,60±0,51</b>
380	5,40	6,00	6,40	<b>5,93</b>	0,50	0,05	0,55	<b>5,93±0,55</b>
400	5,70	6,30	6,77	<b>6,26</b>	0,54	0,05	0,59	<b>6,26±0,59</b>
420	6,00	6,60	7,20	<b>6,33</b>	0,31	0,05	0,36	<b>6,33±0,36</b>
440	6,30	6,90	7,50	<b>6,66</b>	0,32	0,05	0,37	<b>6,66±0,37</b>
460	6,70	7,30	7,90	<b>7,07</b>	0,32	0,05	0,37	<b>7,07±0,37</b>
480	7,10	7,63	8,30	<b>7,41</b>	0,28	0,05	0,33	<b>7,41±0,33</b>
500	7,50	7,98	8,70	<b>7,79</b>	0,26	0,05	0,31	<b>7,79±0,31</b>
520	7,90	8,40	9,10	<b>8,20</b>	0,26	0,05	0,31	<b>8,20±0,31</b>
540	8,30	8,80	9,50	<b>8,60</b>	0,26	0,05	0,31	<b>8,60±0,31</b>
560	8,70	9,18	9,90	<b>8,99</b>	0,26	0,05	0,31	<b>8,99±0,31</b>
580	9,10	9,58	10,30	<b>9,39</b>	0,26	0,05	0,31	<b>9,39±0,31</b>
600	9,50	9,97	10,70	<b>9,79</b>	0,25	0,05	0,30	<b>9,79±0,30</b>
620	9,90	10,36	11,10	<b>10,19</b>	0,25	0,05	0,30	<b>10,19±0,30</b>
640	10,30	10,80	11,50	<b>10,60</b>	0,26	0,05	0,31	<b>10,60±0,31</b>
660	10,70	11,20	11,90	<b>11,00</b>	0,26	0,05	0,31	<b>11,00±0,31</b>
680	11,10	11,53	12,30	<b>11,38</b>	0,24	0,05	0,29	<b>11,38±0,29</b>
700	11,50	11,92	12,70	<b>11,77</b>	0,24	0,05	0,29	<b>11,77±0,29</b>
720	11,90	12,31	13,10	<b>12,17</b>	0,23	0,05	0,28	<b>12,17±0,28</b>
740	12,30	12,70	13,50	<b>12,57</b>	0,23	0,05	0,28	<b>12,57±0,28</b>

Quadro 9 - Valores obtidos experimentalmente para a parede Base (1)

T(s)	Parede Base 20/10/2016 (manhã)	Parede Base 20/10/2016 (tarde)	Parede Base 21/10/2016	TRATAMENTO ESTATISTICO				VALORES FINAIS
	Tensão (mV)	Tensão (mV)	Tensão (mV)	MEDIA	DESVIO	ERRO SISTEMATICO	ERRO TOTAL	TENSÃO ASSUMIDA (mV)
0	1,00	1,00	1,20	<b>1,07</b>	0,12	0,05	0,17	<b>1,07±0,17</b>
20	1,10	1,10	1,20	<b>1,13</b>	0,06	0,05	0,11	<b>1,13±0,11</b>
40	1,20	1,30	1,40	<b>1,30</b>	0,10	0,05	0,15	<b>1,30±0,15</b>
60	1,40	1,50	1,60	<b>1,50</b>	0,10	0,05	0,15	<b>1,50±0,15</b>
80	1,60	1,80	1,90	<b>1,77</b>	0,15	0,05	0,20	<b>1,77±0,20</b>
100	1,80	2,10	2,20	<b>2,03</b>	0,21	0,05	0,26	<b>2,03±0,26</b>
120	2,10	2,40	2,50	<b>2,33</b>	0,21	0,05	0,26	<b>2,33±0,26</b>
140	2,50	2,70	2,80	<b>2,67</b>	0,15	0,05	0,20	<b>2,67±0,20</b>
160	2,80	3,00	3,10	<b>2,97</b>	0,15	0,05	0,20	<b>2,97±0,20</b>
180	3,10	3,40	3,50	<b>3,33</b>	0,21	0,05	0,26	<b>3,33±0,26</b>
200	3,50	3,80	3,90	<b>3,73</b>	0,21	0,05	0,26	<b>3,73±0,26</b>
220	3,90	4,20	4,30	<b>4,13</b>	0,21	0,05	0,26	<b>4,13±0,26</b>
240	4,30	4,60	4,70	<b>4,53</b>	0,21	0,05	0,26	<b>4,53±0,26</b>
260	4,70	5,00	5,10	<b>4,93</b>	0,21	0,05	0,26	<b>4,93±0,26</b>
280	5,10	5,40	5,50	<b>5,33</b>	0,21	0,05	0,26	<b>5,33±0,26</b>
300	5,50	5,80	5,90	<b>5,73</b>	0,21	0,05	0,26	<b>5,73±0,26</b>
320	5,90	6,20	6,30	<b>6,13</b>	0,21	0,05	0,26	<b>6,13±0,26</b>
340	6,30	6,60	6,70	<b>6,53</b>	0,21	0,05	0,26	<b>6,53±0,26</b>
360	6,70	7,00	7,10	<b>6,93</b>	0,21	0,05	0,26	<b>6,93±0,26</b>
380	7,10	7,40	7,50	<b>7,33</b>	0,21	0,05	0,26	<b>7,33±0,26</b>
400	7,50	7,80	7,90	<b>7,73</b>	0,21	0,05	0,26	<b>7,73±0,26</b>
420	7,50	8,20	8,30	<b>8,00</b>	0,44	0,05	0,49	<b>8,00±0,49</b>
440	7,90	8,70	8,50	<b>8,37</b>	0,42	0,05	0,47	<b>8,37±0,47</b>
460	8,40	9,20	9,00	<b>8,87</b>	0,42	0,05	0,47	<b>8,87±0,47</b>
480	8,90	9,90	9,50	<b>9,43</b>	0,50	0,05	0,55	<b>9,43±0,55</b>
500	9,40	10,30	10,00	<b>9,77</b>	0,32	0,05	0,37	<b>9,77±0,37</b>
520	9,90	10,80	10,50	<b>10,23</b>	0,31	0,05	0,36	<b>10,23±0,36</b>
540	10,40	11,30	11,00	<b>10,73</b>	0,31	0,05	0,36	<b>10,73±0,36</b>
560	10,90	11,80	11,50	<b>11,23</b>	0,31	0,05	0,36	<b>11,23±0,36</b>
580	11,40	12,30	12,00	<b>11,73</b>	0,31	0,05	0,36	<b>11,73±0,36</b>
600	11,90	12,80	12,50	<b>12,23</b>	0,31	0,05	0,36	<b>12,23±0,36</b>
620	12,40	13,40	13,00	<b>12,73</b>	0,31	0,05	0,36	<b>12,73±0,36</b>
640	12,90	13,86	13,50	<b>13,27</b>	0,32	0,05	0,37	<b>13,27±0,37</b>
660	13,40	14,37	14,00	<b>13,75</b>	0,31	0,05	0,36	<b>13,75±0,36</b>
680	13,90	14,88	14,50	<b>14,26</b>	0,32	0,05	0,37	<b>14,26±0,37</b>
700	14,40	15,39	15,00	<b>14,76</b>	0,32	0,05	0,37	<b>14,76±0,37</b>
720	14,90	15,88	15,50	<b>15,26</b>	0,32	0,05	0,37	<b>15,26±0,37</b>
740	15,40	16,38	16,00	<b>15,76</b>	0,32	0,05	0,37	<b>15,76±0,37</b>

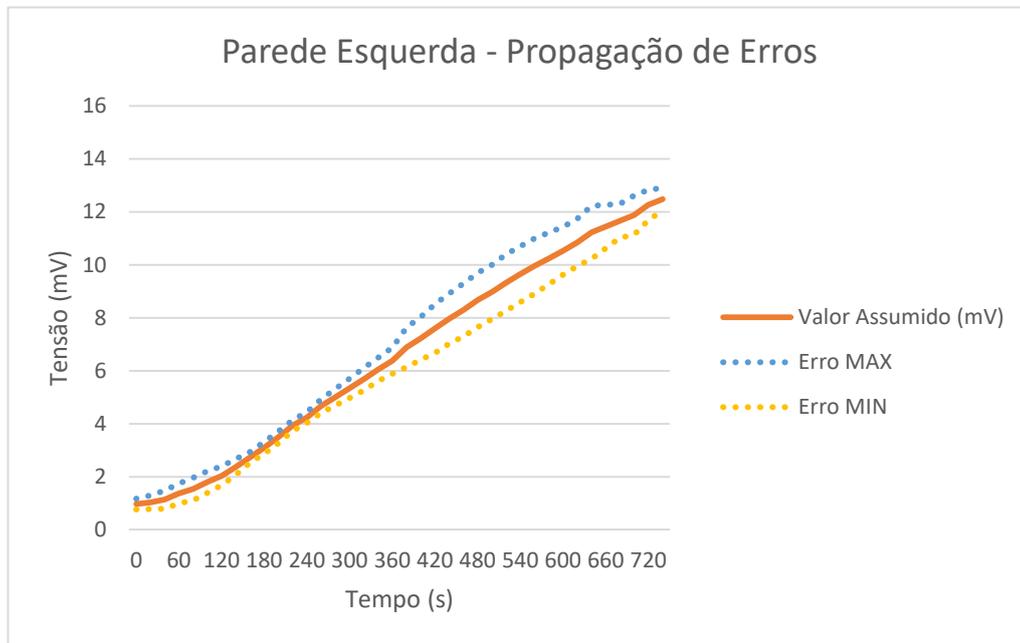
Quadro 10 - Valores obtidos experimentalmente para a parede Fundo (4)

T(s)	Parede Fundo 08/11/2016 (manhã)	Parede Fundo 08/11/2016 (tarde)	Parede Fundo 14/11/2016	TRATAMENTO ESTATISTICO				VALORES FINAIS
	Tensão (mV)	Tensão (mV)	Tensão (mV)	MEDIA	DESVIO	ERRO SISTEMATICO	ERRO TOTAL	TENSÃO ASSUMIDA (mV)
0	1,10	1,30	1,20	<b>1,20</b>	0,10	0,05	0,15	<b>1,20±0,15</b>
20	1,20	1,40	1,40	<b>1,33</b>	0,12	0,05	0,17	<b>1,33±0,17</b>
40	1,20	1,50	1,60	<b>1,43</b>	0,21	0,05	0,26	<b>1,43±0,21</b>
60	1,40	1,80	1,90	<b>1,70</b>	0,26	0,05	0,31	<b>1,70±0,31</b>
80	1,70	2,10	2,20	<b>2,00</b>	0,26	0,05	0,31	<b>2,00±0,31</b>
100	2,00	2,40	2,40	<b>2,27</b>	0,23	0,05	0,28	<b>2,27±0,28</b>
120	2,30	2,70	2,70	<b>2,57</b>	0,23	0,05	0,28	<b>2,57±0,28</b>
140	2,60	3,00	2,93	<b>2,84</b>	0,21	0,05	0,26	<b>2,84±0,26</b>
160	2,90	3,30	3,18	<b>3,13</b>	0,21	0,05	0,26	<b>3,13±0,26</b>
180	3,20	3,60	3,43	<b>3,41</b>	0,20	0,05	0,25	<b>3,41±0,25</b>
200	3,50	3,90	3,68	<b>3,69</b>	0,20	0,05	0,25	<b>3,69±0,25</b>
220	3,90	4,30	4,10	<b>4,10</b>	0,20	0,05	0,25	<b>4,10±0,25</b>
240	4,20	4,60	4,40	<b>4,40</b>	0,20	0,05	0,25	<b>4,40±0,25</b>
260	4,70	5,00	4,93	<b>4,88</b>	0,16	0,05	0,21	<b>4,88±0,21</b>
280	5,00	5,40	5,30	<b>5,23</b>	0,21	0,05	0,26	<b>5,23±0,26</b>
300	5,40	5,90	5,77	<b>5,69</b>	0,26	0,05	0,31	<b>5,69±0,31</b>
320	5,90	6,30	6,18	<b>6,13</b>	0,21	0,05	0,26	<b>6,13±0,26</b>
340	6,20	6,70	6,50	<b>6,47</b>	0,25	0,05	0,30	<b>6,47±0,30</b>
360	6,60	7,10	6,90	<b>6,87</b>	0,25	0,05	0,30	<b>6,87±0,30</b>
380	7,00	7,50	7,30	<b>7,27</b>	0,25	0,05	0,30	<b>7,27±0,30</b>
400	7,50	7,90	7,60	<b>7,67</b>	0,21	0,05	0,26	<b>7,67±0,26</b>
420	7,90	8,30	8,00	<b>8,07</b>	0,21	0,05	0,26	<b>8,07±0,26</b>
440	8,30	8,70	8,60	<b>8,53</b>	0,21	0,05	0,26	<b>8,53±0,26</b>
460	8,70	9,10	9,00	<b>8,93</b>	0,21	0,05	0,26	<b>8,93±0,26</b>
480	9,10	9,50	9,40	<b>9,33</b>	0,21	0,05	0,26	<b>9,33±0,26</b>
500	9,50	9,90	9,80	<b>9,73</b>	0,21	0,05	0,26	<b>9,73±0,26</b>
520	10,00	10,40	10,30	<b>10,23</b>	0,21	0,05	0,26	<b>10,23±0,26</b>
540	10,50	10,90	10,80	<b>10,73</b>	0,21	0,05	0,26	<b>10,73±0,26</b>
560	11,00	11,40	11,30	<b>11,23</b>	0,21	0,05	0,26	<b>11,23±0,26</b>
580	11,50	11,90	11,80	<b>11,73</b>	0,21	0,05	0,26	<b>11,73±0,26</b>
600	12,00	12,40	12,30	<b>12,23</b>	0,21	0,05	0,26	<b>12,23±0,26</b>
620	12,50	12,90	12,80	<b>12,73</b>	0,21	0,05	0,26	<b>12,73±0,26</b>
640	13,00	13,30	13,20	<b>13,17</b>	0,15	0,05	0,20	<b>13,17±0,20</b>
660	13,50	13,70	13,60	<b>13,60</b>	0,10	0,05	0,15	<b>13,60±0,15</b>
680	13,80	14,10	14,00	<b>13,97</b>	0,15	0,05	0,20	<b>13,97±0,20</b>
700	14,20	14,50	14,40	<b>14,38</b>	0,13	0,05	0,18	<b>14,38±0,18</b>
720	14,60	14,90	14,80	<b>14,78</b>	0,13	0,05	0,18	<b>14,78±0,18</b>
740	15,00	15,30	15,20	<b>15,18</b>	0,13	0,05	0,18	<b>15,18±0,18</b>

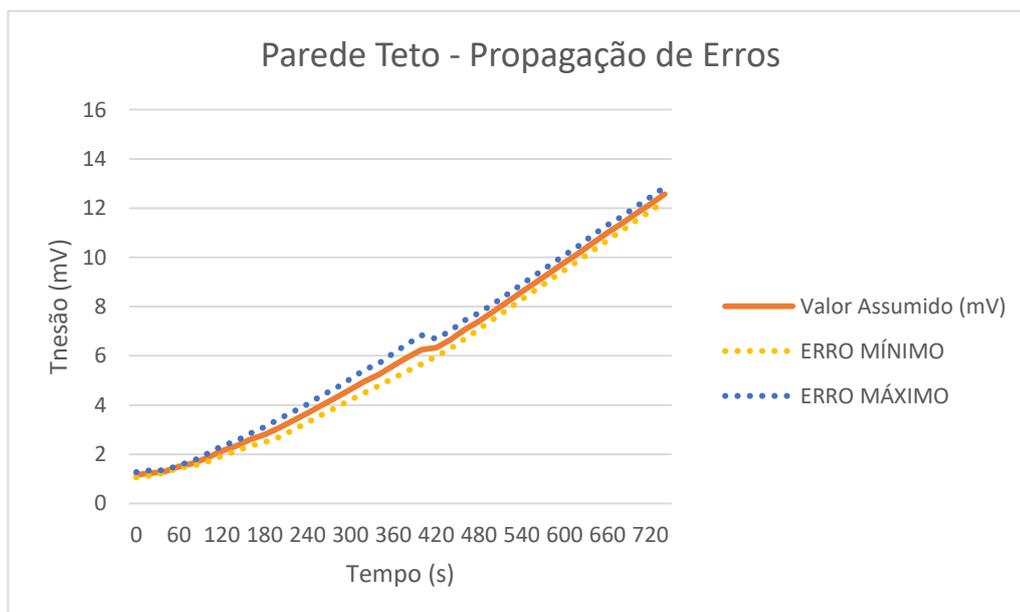
Quadro 11 - Valores obtidos experimentalmente para a parede Frente (3)

T(s)	Parede Frente 31/10/2016	Parede Frente 01/11/2016 (manhã)	Parede Frente 01/11/2016 (tarde)	TRATAMENTO ESTATISTICO				VALORES FINAIS
	Tensão (mV)	Tensão (mV)	Tensão (mV)	MEDIA	DESVIO	ERRO SISTEMATICO	ERRO TOTAL	TENSÃO ASSUMIDA (mV)
0	0,90	1,10	0,80	<b>0,93</b>	0,15	0,05	0,20	<b>0,93±0,20</b>
20	0,90	1,20	0,90	<b>1,00</b>	0,17	0,05	0,22	<b>1,00±0,22</b>
40	1,10	1,30	1,00	<b>1,13</b>	0,15	0,05	0,20	<b>1,13±0,20</b>
60	1,20	1,40	1,10	<b>1,23</b>	0,15	0,05	0,20	<b>1,23±0,20</b>
80	1,30	1,60	1,30	<b>1,40</b>	0,17	0,05	0,22	<b>1,40±0,22</b>
100	1,50	1,80	1,50	<b>1,60</b>	0,17	0,05	0,22	<b>1,60±0,22</b>
120	1,70	2,00	1,80	<b>1,83</b>	0,15	0,05	0,20	<b>1,83±0,20</b>
140	1,90	2,20	2,00	<b>2,03</b>	0,15	0,05	0,20	<b>2,03±0,20</b>
160	2,20	2,50	2,20	<b>2,30</b>	0,17	0,05	0,22	<b>2,30±0,22</b>
180	2,50	2,80	2,40	<b>2,57</b>	0,21	0,05	0,26	<b>2,57±0,26</b>
200	2,70	3,00	2,60	<b>2,77</b>	0,21	0,05	0,26	<b>2,77±0,26</b>
220	3,00	3,30	2,90	<b>3,07</b>	0,21	0,05	0,26	<b>3,07±0,26</b>
240	3,30	3,60	3,20	<b>3,37</b>	0,21	0,05	0,26	<b>3,37±0,26</b>
260	3,55	3,86	3,50	<b>3,64</b>	0,20	0,05	0,25	<b>3,64±0,25</b>
280	3,82	4,13	3,80	<b>3,92</b>	0,19	0,05	0,24	<b>3,92±0,24</b>
300	4,09	4,41	4,10	<b>4,20</b>	0,18	0,05	0,23	<b>4,20±0,23</b>
320	4,36	4,68	4,40	<b>4,48</b>	0,18	0,05	0,23	<b>4,48±0,23</b>
340	4,63	4,96	4,70	<b>4,76</b>	0,17	0,05	0,22	<b>4,76±0,22</b>
360	4,90	5,23	5,00	<b>5,04</b>	0,17	0,05	0,22	<b>5,04±0,22</b>
380	5,20	5,60	5,40	<b>5,40</b>	0,20	0,05	0,25	<b>5,40±0,25</b>
400	5,60	5,90	5,70	<b>5,73</b>	0,15	0,05	0,20	<b>5,73±0,20</b>
420	5,90	6,20	6,10	<b>6,07</b>	0,15	0,05	0,20	<b>6,07±0,20</b>
440	6,20	6,40	6,40	<b>6,33</b>	0,12	0,05	0,17	<b>6,33±0,17</b>
460	6,60	6,80	6,80	<b>6,73</b>	0,12	0,05	0,17	<b>6,73±0,17</b>
480	7,00	7,20	7,20	<b>7,13</b>	0,12	0,05	0,17	<b>7,13±0,17</b>
500	7,40	7,60	7,61	<b>7,54</b>	0,12	0,05	0,17	<b>7,54±0,17</b>
520	7,80	8,00	7,90	<b>7,90</b>	0,10	0,05	0,15	<b>7,90±0,15</b>
540	8,20	8,40	8,30	<b>8,30</b>	0,10	0,05	0,15	<b>8,30±0,15</b>
560	8,60	8,80	8,70	<b>8,70</b>	0,10	0,05	0,15	<b>8,70±0,15</b>
580	9,00	9,20	9,10	<b>9,10</b>	0,10	0,05	0,15	<b>9,10±0,15</b>
600	9,40	9,60	9,50	<b>9,50</b>	0,10	0,05	0,15	<b>9,50±0,15</b>
620	9,80	10,00	9,91	<b>9,90</b>	0,10	0,05	0,15	<b>9,90±0,15</b>
640	10,20	10,40	10,31	<b>10,30</b>	0,10	0,05	0,15	<b>10,30±0,15</b>
660	10,70	10,90	10,71	<b>10,77</b>	0,11	0,05	0,16	<b>10,77±0,16</b>
680	11,10	11,30	11,10	<b>11,17</b>	0,12	0,05	0,17	<b>11,17±0,17</b>
700	11,60	11,80	11,50	<b>11,63</b>	0,15	0,05	0,20	<b>11,63±0,20</b>
720	12,00	12,40	12,00	<b>12,13</b>	0,23	0,05	0,28	<b>12,13±0,28</b>
740	12,50	12,80	12,50	<b>12,60</b>	0,17	0,05	0,22	<b>12,60±0,22</b>

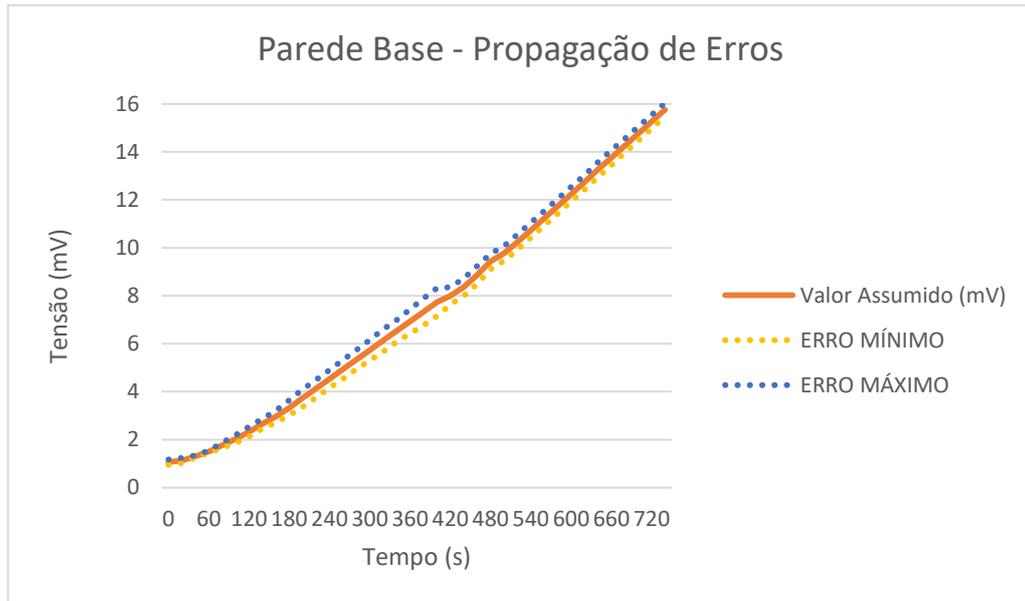
**APENDICE B:** O presente apêndice apresenta os gráficos gerados a partir das tensões medidas nas paredes da mufla assim como seus erros totais associados.



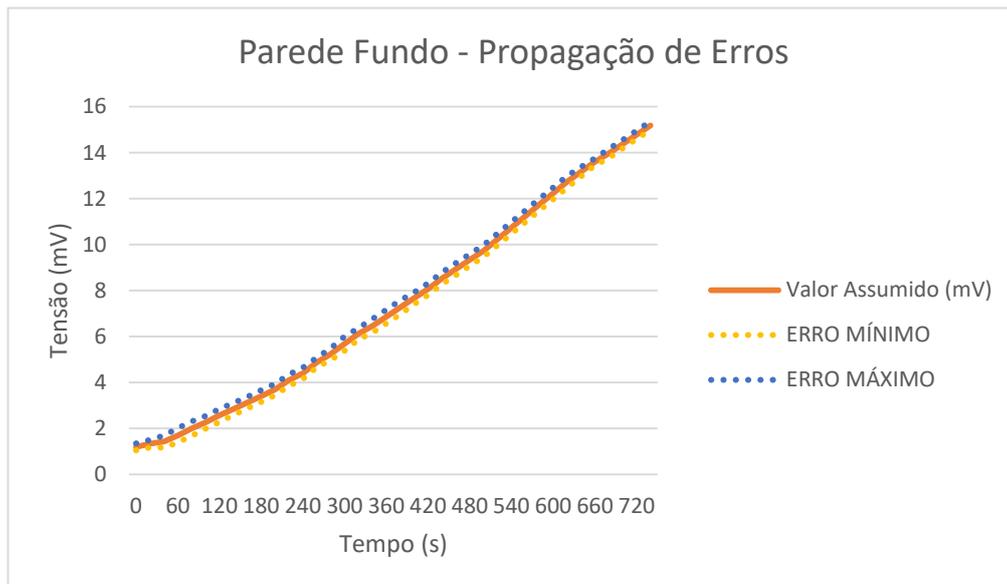
**Figura 31** - Gráfico da propagação de erros da parede esquerda.



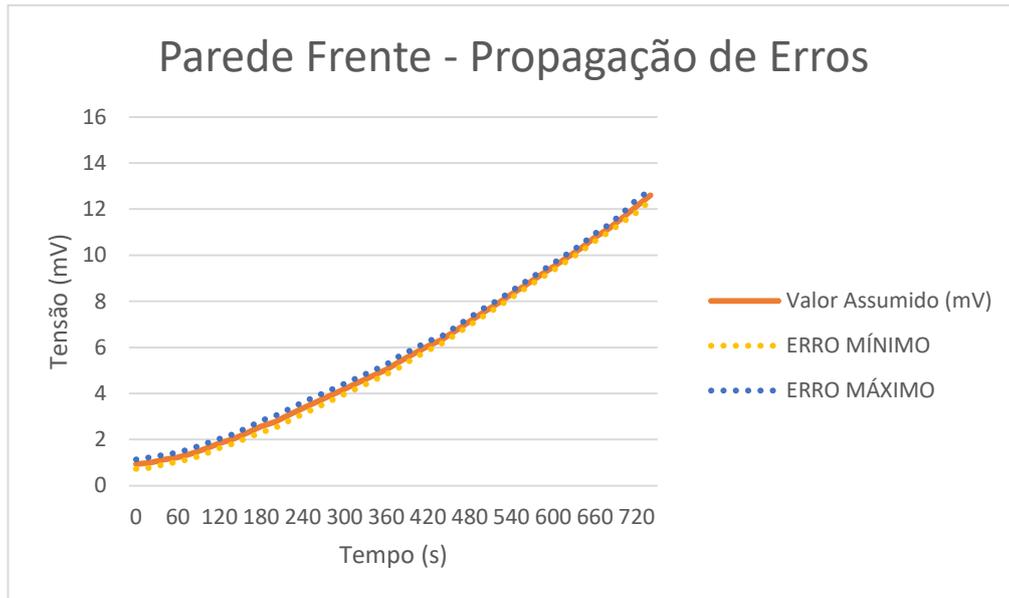
**Figura 32** - Gráfico da propagação de erros da parede teto.



**Figura 33** - Gráfico da propagação de erros da parede base.



**Figura 34** - Gráfico da propagação de erros da parede fundo.



**Figura 35** - Gráfico da propagação de erros da parede frente.

**APENDICE C:** O apêndice C apresenta o código numérico utilizado no software *MatLab 2016* para obtenção dos valores de radiosidades e de taxas de transferências de calor por radiação. Como valores de entrada, foram utilizados os dados obtidos experimentalmente com o auxílio dos sensores nas paredes da mufla assim como seus erros totais associados.

```

clc,clear all;
%dimensoes do reator
l1=0.15;
l2=0.30;
l3=0.15;

%emissividade do aço-carbono
e1=0.75;
e2=0.75;
e3=0.75;
e4=0.75;
e5=0.75;
e6=0.75;

% temperatura medida
t1=302; %valor estimado de temperatura em kelvin para validar o codigo
t2=300; %valor estimado de temperatura em kelvin para validar o codigo
t3=299; %valor estimado de temperatura em kelvin para validar o codigo
t4=300; %valor estimado de temperatura em kelvin para validar o codigo
t5=301; %valor estimado de temperatura em kelvin para validar o codigo
t6=300; %valor estimado de temperatura em kelvin para validar o codigo

%-----
%Calculo das areas:

%-----
A1=l1*l2;
A2=l2*l3;
A3=l3*l1;
A4=A3;
A5=A2;
A6=A1;

%-----
% fatores de forma para superficies em paralelo

```

```

x1=11/12;
y1=13/12;
ter11=(2/(pi*x1*y1));
ter21=((1+x1^2)*(1+y1^2)/(1+x1^2+y1^2));
ter31=x1*((1+y1^2)^0.5);
p11=atan(x1/((1+y1^2)^0.5));
p13=ter31*p11;
ter41=y1*((1+x1^2)^0.5);
p21=atan(y1/((1+x1^2)^0.5));
p41=ter41*p21;
ter51=x1*atan(x1);
ter61=y1*atan(y1);
fparalelo1=ter11*(log((ter21)^0.5)+p13+p41-ter51-ter61);
F34=fparalelo1;
F43=F34;

%-----
x2=12/13;
y2=11/13;
ter12=(2/(pi*x2*y2));
ter22=((1+x2^2)*(1+y2^2)/(1+x2^2+y2^2));
ter32=x2*((1+y2^2)^0.5);
p12=atan(x2/((1+y2^2)^0.5));
p32=ter32*p12;
ter42=y2*((1+x2^2)^0.5);
p22=atan(y2/((1+x2^2)^0.5));
p42=ter42*p22;
ter52=x2*atan(x2);
ter62=y2*atan(y2);
fparalelo2=ter12*(log((ter22)^0.5)+p32+p42-ter52-ter62);
F52=fparalelo2;
F25=F52;

%-----
x3=13/11;
y3=12/11;
ter13=(2/(pi*x3*y3));
ter23=((1+x3^2)*(1+y3^2)/(1+x3^2+y3^2));
ter33=x3*((1+y3^2)^0.5);
p13=atan(x3/((1+y3^2)^0.5));

```

```

p33=ter33*p13;
ter43=y3*((1+x3^2)^0.5);
p23=atan(y3/((1+x3^2)^0.5));
p43=ter43*p23;
ter53=x3*atan(x3);
ter63=y3*atan(y3);
fparalelo3=ter13*(log((ter23)^0.5)+p33+p43-ter53-ter63);
F16=fparalelo3;
F61=F16;

%-----
%factores de forma de superficies perpendiculares
%F12=F16=F21=F62=F15=F65=F51=F56
h=l3/l1;
w=l2/l1;
TER11=(1/(pi*w));
TER21=w*atan(1/w);
TER31=h*atan(1/h);
TER41=((h^2+w^2)^0.5)*atan(1/((w^2+h^2)^0.5));
TER51=((1+w^2)*(1+h^2))/(1+w^2+h^2);
o1=w^2;
o2=1+w^2+h^2;
o3=1+w^2;
o4=w^2+h^2;
o5=(o1*o2);
o6=(o3*o4);
TER61=o5/o6;
TER81=TER61^(w^2);
r1=h^2;
r2=1+w^2+h^2;
r3=1+h^2;
r4=w^2+h^2;
r5=(r1*r2);
r6=(r3*r4);
TER71=r5/r6;
TER91=TER71^(h^2);
fperpendicular1=(TER11*(TER21+TER31-TER41+(log(TER51*TER81*TER91)/4)));

F56=fperpendicular1;

```

```

F51=F56;
F65=F51;
F15=F65;
F62=F15;
F21=F62;
F12=F62;
F26=F62;
%-----
%F13=F63=F31=F36=F14=F64=F41=F46
h2=11/12;
w2=13/12;
TER12=(1/(pi*w2));
TER22=w2*atan(1/w2);
TER32=h2*atan(1/h2);
TER42=((h2^2+w2^2)^0.5)*atan(1/((w2^2+h2^2)^0.5));
TER52=(((1+w2^2)*(1+h2^2))/(1+w2^2+h2^2));
o12=w2^2;
o22=1+w2^2+h2^2;
o32=1+w2^2;
o42=w2^2+h2^2;
o52=(o12*o22);
o62=(o32*o42);
TER62=o52/o62;
TER82=TER62^(w2^2);
r12=h2^2;
r22=1+w2^2+h2^2;
r32=1+h2^2;
r42=w2^2+h2^2;
r52=(r12*r22);
r62=(r32*r42);
TER72=r52/r62;
TER92=TER72^(h2^2);
fperpendicular2=(TER12*(TER22+TER32-TER42+(log(TER52*TER82*TER92)/4)));

F46=fperpendicular2;
F41=F46;
F64=F41;
F14=F64;
F36=F14;
F31=F36;

```

```

F63=F31;
F13=F63;
%-----
%F23=F24=F42=F32=F53=F54=F35=F45
h3=11/12;
w3=13/12;
TER13=(1/(pi*w3));
TER23=w3*atan(1/w3);
TER33=h3*atan(1/h3);
TER43=((h3^2+w3^2)^0.5)*atan(1/((w3^2+h3^2)^0.5));
TER53((((1+w3^2)*(1+h3^2))/(1+w3^2+h3^2)));
o13=w3^2;
o23=1+w3^2+h3^2;
o33=1+w3^2;
o43=w3^2+h3^2;
o53=(o13*o23);
o63=(o33*o43);
TER63=o53/o63;
TER83=TER63^(w3^2);
r13=h3^2;
r23=1+w3^2+h3^2;
r33=1+h3^2;
r43=w3^2+h3^2;
r53=(r13*r23);
r63=(r33*r43);
TER73=r53/r63;
TER93=TER73^(h3^2);
fperpendicular3=(TER13*(TER23+TER33-TER43+(log(TER53*TER83*TER93)/4)));

F45=fperpendicular3;
F35=F45;
F54=F35;
F53=F54;
F32=F53;
F42=F32;
F24=F42;
F23=F24;

```

```

a11=+1/((1-e1)/(e1*A1))+A1*F12+A1*F13+A1*F14+A1*F15+A1*F16;
a22=+A2*F21+1/((1-e2)/(e2*A2))+A2*F23+A2*F24+A2*F25+A2*F26;
a33=+A3*F31+A3*F32+1/((1-e3)/(e3*A3))+A3*F34+A3*F35+A3*F36;
a44=+A4*F41+A4*F42+A4*F43+1/((1-e4)/(e4*A4))+A4*F45+A4*F46;
a55=+A5*F51+A5*F52+A5*F53+A5*F54+1/((1-e5)/(e5*A5))+A5*F56;
a66=+A6*F61+A6*F62+A6*F63+A6*F64+A6*F65+1/((1-e6)/(e6*A6));

```

```

A=[ a11  -A1*F12 -A1*F13 -A1*F14 -A1*F15 -A1*F16
    -A2*F21  a22  -A2*F23 -A2*F24 -A2*F25 -A2*F26
    -A3*F31 -A3*F32  a33  -A3*F34 -A3*F35 -A3*F36
    -A4*F41 -A4*F42 -A4*F43  a44  -A4*F45 -A4*F46
    -A5*F51 -A5*F52 -A5*F53 -A5*F54  a55  -A5*F56
    -A6*F61 -A6*F62 -A6*F63 -A6*F64 -A6*F65  a66];

```

```

sigma=5.67e-8;% W/(m^2K^4) %constante de Stefan-boltzmann

```

```

E1=sigma*t1^4;

```

```

E2=sigma*t2^4;

```

```

E3=sigma*t3^4;

```

```

E4=sigma*t4^4;

```

```

E5=sigma*t5^4;

```

```

E6=sigma*t6^4;

```

```

b1=E1/((1-e1)/(e1*A1));

```

```

b2=E2/((1-e2)/(e2*A2));

```

```

b3=E3/((1-e3)/(e3*A3));

```

```

b4=E4/((1-e4)/(e4*A4));

```

```

b5=E5/((1-e5)/(e5*A5));

```

```

b6=E6/((1-e5)/(e6*A6));

```

```

B=[b1,b2,b3,b4,b5,b6]';

```

```

%-----

```

```

%Resolvendo J

```

```

J=A\B

```

% os valores  $q_i$  e  $Q_i$  são iguais, calculados de duas formas afim de validar o código

$$q1=(E1-J(1))/((1-e1)/(e1*A1))$$

$$\% Q12=A1*F12*(J(1)-J(2));$$

$$\% Q13=A1*F13*(J(1)-J(3));$$

$$\% Q14=A1*F14*(J(1)-J(4));$$

$$\% Q15=A1*F15*(J(1)-J(5));$$

$$\% Q16=A1*F16*(J(1)-J(6));$$

$$\% Q1=Q12+Q13+Q14+Q15+Q16$$

$$q2=(E2-J(2))/((1-e2)/(e2*A2))$$

$$\% Q21=A2*F21*(J(2)-J(1));$$

$$\% Q23=A2*F23*(J(2)-J(3));$$

$$\% Q24=A2*F24*(J(2)-J(4));$$

$$\% Q25=A2*F25*(J(2)-J(5));$$

$$\% Q26=A2*F26*(J(2)-J(6));$$

$$\% Q2=Q21+Q21+Q24+Q25+Q26$$

$$q3=(E3-J(3))/((1-e3)/(e3*A3))$$

$$\% Q31=A3*F31*(J(3)-J(1));$$

$$\% Q32=A3*F32*(J(3)-J(2));$$

$$\% Q34=A3*F34*(J(3)-J(4));$$

$$\% Q35=A3*F35*(J(3)-J(5));$$

$$\% Q36=A3*F36*(J(3)-J(6));$$

$$\% Q3=Q31+Q32+Q34+Q35+Q36$$

$$q4=(E4-J(4))/((1-e4)/(e4*A4))$$

$$\% Q41=A4*F41*(J(4)-J(1));$$

$$\% Q42=A4*F42*(J(4)-J(2));$$

$$\% Q43=A4*F43*(J(4)-J(3));$$

$$\% Q45=A4*F45*(J(4)-J(5));$$

$$\% Q46=A4*F46*(J(4)-J(6));$$

$$\% Q4=Q41+Q42+Q43+Q45+Q46$$

$$q5=(E5-J(5))/((1-e5)/(e5*A5))$$

$$\% Q51=A5*F51*(J(5)-J(1));$$

$$\% Q52=A5*F52*(J(5)-J(2));$$

$$\% Q53=A5*F53*(J(5)-J(3));$$

$$\% Q54=A5*F54*(J(5)-J(4));$$

$$\% Q56=A5*F56*(J(5)-J(6));$$

```
%Q5=Q51+Q52+Q53+Q54+Q56
```

```
q6=(E6-J(6))/((1-e6)/(e6*A6))
```

```
%Q61=A6*F61*(J(6)-J(1));
```

```
%Q62=A6*F62*(J(6)-J(2));
```

```
%Q63=A6*F63*(J(6)-J(3));
```

```
%Q64=A6*F64*(J(6)-J(4));
```

```
%Q65=A6*F65*(J(6)-J(5));
```

```
%Q6=Q61+Q62+Q63+Q64+Q65
```

**ANEXOS**

**Anexo A:** O documento aqui anexo é a tabela de conversão do termopar do tipo K utilizada para converter os valores de tensão medidos em seus valores de temperatura correspondentes.

**TABELA 10 Termopar Tipo K**  
Temperatura em Graus Celsius (ITS-90)

EMF em Milivolts											
											Junções à 0°C
°C	-0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
<b>VOLTAGEM TERMOELÉTRICA EM MILIVOLTS</b>											
-270	-6.458										
-260	-6.441	-6.444	-6.446	-6.448	-6.450	-6.452	-6.453	-6.455	-6.456	-6.457	-6.458
-250	-6.404	-6.408	-6.413	-6.417	-6.421	-6.425	-6.429	-6.432	-6.435	-6.438	-6.441
-240	-6.344	-6.351	-6.358	-6.364	-6.370	-6.377	-6.382	-6.388	-6.393	-6.399	-6.404
-230	-6.262	-6.271	-6.280	-6.289	-6.297	-6.306	-6.314	-6.322	-6.329	-6.337	-6.344
-220	-6.158	-6.170	-6.181	-6.192	-6.202	-6.213	-6.223	-6.233	-6.243	-6.252	-6.262
-210	-6.035	-6.048	-6.061	-6.074	-6.087	-6.099	-6.111	-6.123	-6.135	-6.147	-6.158
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021	-6.035
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.797	-5.813	-5.829	-5.845	-5.861	-5.876	-5.891
-180	-5.550	-5.569	-5.588	-5.606	-5.624	-5.642	-5.660	-5.678	-5.695	-5.713	-5.730
-170	-5.354	-5.374	-5.395	-5.415	-5.435	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531	-5.550
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.228	-5.250	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333	-5.354
-150	-4.913	-4.936	-4.960	-4.993	-5.006	-5.029	-5.052	-5.074	-5.097	-5.119	-5.141
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.744	-4.768	-4.793	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889	-4.913
-130	-4.411	-4.437	-4.463	-4.490	-4.516	-4.542	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644	-4.669
-120	-4.138	-4.166	-4.194	-4.221	-4.249	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384	-4.411
-110	-3.852	-3.882	-3.911	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.054	-4.082	-4.110	-4.138
-100	-3.554	-3.584	-3.614	-3.645	-3.675	-3.705	-3.734	-3.764	-3.794	-3.823	-3.852
-90	-3.243	-3.274	-3.306	-3.337	-3.368	-3.400	-3.431	-3.462	-3.492	-3.523	-3.554
-80	-2.920	-2.953	-2.986	-3.018	-3.050	-3.083	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211	-3.243
-70	-2.587	-2.620	-2.654	-2.688	-2.721	-2.755	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887	-2.920
-60	-2.243	-2.278	-2.312	-2.347	-2.382	-2.416	-2.450	-2.485	-2.519	-2.553	-2.587
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.103	-2.138	-2.173	-2.208	-2.243
-40	-1.527	-1.564	-1.600	-1.637	-1.673	-1.709	-1.745	-1.782	-1.818	-1.854	-1.889
-30	-1.156	-1.194	-1.231	-1.268	-1.305	-1.343	-1.380	-1.417	-1.453	-1.490	-1.527
-20	-0.778	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.006	-1.043	-1.081	-1.119	-1.156
-10	-0.392	-0.431	-0.470	-0.508	-0.547	-0.586	-0.624	-0.663	-0.701	-0.739	-0.778
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138

**Figura 36** - Tabela de conversão Tensão/Temperatura do termopar tipo K (parte 1/4).

**TABELA 10 Termopar Tipo K**  
 Temperatura em Graus Celsius (ITS-90)

EMF em Milivolts		Junções à 0°C									
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>VOLTAGEM TERMOELÉTRICA EM MILIVOLTS</b>											
200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091
440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941
460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366
470	19.366	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792
480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218
490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644
500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071
510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.497
520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.924
530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350
540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776
550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.203
560	23.203	23.245	23.288	23.331	23.373	23.416	23.458	23.501	23.544	23.586	23.629
570	23.629	23.671	23.714	23.757	23.799	23.842	23.884	23.927	23.970	24.012	24.055
580	24.055	24.097	24.140	24.182	24.225	24.267	24.310	24.353	24.395	24.438	24.480
590	24.480	24.523	24.565	24.608	24.650	24.693	24.735	24.778	24.820	24.863	24.905
600	24.905	24.948	24.990	25.033	25.075	25.118	25.160	25.203	25.245	25.288	25.330
610	25.330	25.373	25.415	25.458	25.500	25.543	25.585	25.627	25.670	25.712	25.755
620	25.755	25.797	25.840	25.882	25.924	25.967	26.009	26.052	26.094	26.136	26.179
630	26.179	26.221	26.263	26.306	26.348	26.390	26.433	26.475	26.517	26.560	26.602
640	26.602	26.644	26.687	26.729	26.771	26.814	26.856	26.898	26.940	26.983	27.025
650	27.025	27.067	27.109	27.152	27.194	27.236	27.278	27.320	27.363	27.405	27.447
660	27.447	27.489	27.531	27.574	27.616	27.658	27.700	27.742	27.784	27.826	27.869
670	27.869	27.911	27.953	27.995	28.037	28.079	28.121	28.163	28.205	28.247	28.289
680	28.289	28.332	28.374	28.416	28.458	28.500	28.542	28.584	28.626	28.668	28.710
690	28.710	28.752	28.794	28.835	28.877	28.919	28.961	29.003	29.045	29.087	29.129

**Figura 37 - Tabela de conversão Tensão/Temperatura do termopar tipo K (parte2/4).**

**TABELA 10 Termopar Tipo K**  
 Temperatura em Graus Celsius (ITS-90)

EMF em Milivolts		Junções à 0°C									
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VOLTAGEM TERMOELÉTRICA EM MILIVOLTS											
700	29.129	29.171	29.213	29.255	29.297	29.338	29.380	29.422	29.464	29.506	29.548
710	29.548	29.589	29.631	29.673	29.715	29.757	29.798	29.840	29.882	29.924	29.965
720	29.965	30.007	30.049	30.090	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341	30.382
730	30.382	30.424	30.466	30.507	30.549	30.590	30.632	30.674	30.715	30.757	30.798
740	30.798	30.840	30.881	30.923	30.964	31.006	31.047	31.089	31.130	31.172	31.213
750	31.213	31.255	31.296	31.338	31.379	31.421	31.462	31.504	31.545	31.586	31.628
760	31.628	31.669	31.710	31.752	31.793	31.834	31.876	31.917	31.958	32.000	32.041
770	32.041	32.082	32.124	32.165	32.206	32.247	32.289	32.330	32.371	32.412	32.453
780	32.453	32.495	32.536	32.577	32.618	32.659	32.700	32.742	32.783	32.824	32.865
790	32.865	32.906	32.947	32.988	33.029	33.070	33.111	33.152	33.193	33.234	33.275
800	33.275	33.316	33.357	33.398	33.439	33.480	33.521	33.562	33.603	33.644	33.685
810	33.685	33.726	33.767	33.808	33.848	33.889	33.930	33.971	34.012	34.053	34.093
820	34.093	34.134	34.175	34.216	34.257	34.297	34.338	34.379	34.420	34.460	34.501
830	34.501	34.542	34.582	34.623	34.664	34.704	34.745	34.786	34.826	34.867	34.908
840	34.908	34.948	34.989	35.029	35.070	35.110	35.151	35.192	35.232	35.273	35.313
850	35.313	35.354	35.394	35.435	35.475	35.516	35.556	35.596	35.637	35.677	35.718
860	35.718	35.758	35.798	35.839	35.879	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081	36.121
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.484	36.524
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.685	36.725	36.765	36.805	36.845	36.885	36.925
890	36.925	36.965	37.006	37.046	37.086	37.126	37.166	37.206	37.246	37.286	37.326
900	37.326	37.366	37.406	37.446	37.486	37.526	37.566	37.606	37.646	37.686	37.725
910	37.725	37.765	37.805	37.845	37.885	37.925	37.965	38.005	38.044	38.084	38.124
920	38.124	38.164	38.204	38.243	38.283	38.323	38.363	38.402	38.442	38.482	38.522
930	38.522	38.561	38.601	38.641	38.680	38.720	38.760	38.799	38.839	38.878	38.918
940	38.918	38.958	38.997	39.037	39.076	39.116	39.155	39.195	39.235	39.274	39.314
950	39.314	39.353	39.393	39.432	39.471	39.511	39.550	39.590	39.629	39.669	39.708
960	39.708	39.747	39.787	39.826	39.866	39.905	39.944	39.984	40.023	40.062	40.101
970	40.101	40.141	40.180	40.219	40.259	40.298	40.337	40.376	40.415	40.455	40.494
980	40.494	40.533	40.572	40.611	40.651	40.690	40.729	40.768	40.807	40.846	40.885
990	40.885	40.924	40.963	41.002	41.042	41.081	41.120	41.159	41.198	41.237	41.276
1000	41.276	41.315	41.354	41.393	41.431	41.470	41.509	41.548	41.587	41.626	41.665
1010	41.665	41.704	41.743	41.781	41.820	41.859	41.898	41.937	41.976	42.014	42.053
1020	42.053	42.092	42.131	42.169	42.208	42.247	42.286	42.324	42.363	42.402	42.440
1030	42.440	42.479	42.518	42.556	42.595	42.633	42.672	42.711	42.749	42.788	42.826
1040	42.826	42.865	42.903	42.942	42.980	43.019	43.057	43.096	43.134	43.173	43.211
1050	43.211	43.250	43.288	43.327	43.365	43.403	43.442	43.480	43.518	43.557	43.595
1060	43.595	43.633	43.672	43.710	43.748	43.787	43.825	43.863	43.901	43.940	43.978
1070	43.978	44.016	44.054	44.092	44.130	44.169	44.207	44.245	44.283	44.321	44.359
1080	44.359	44.397	44.435	44.473	44.512	44.550	44.588	44.626	44.664	44.702	44.740
1090	44.740	44.778	44.816	44.853	44.891	44.929	44.967	45.005	45.043	45.081	45.119
1100	45.119	45.157	45.194	45.232	45.270	45.308	45.346	45.383	45.421	45.459	45.497
1110	45.497	45.534	45.572	45.610	45.647	45.685	45.723	45.760	45.798	45.836	45.873
1120	45.873	45.911	45.948	45.986	46.024	46.061	46.099	46.136	46.174	46.211	46.249
1130	46.249	46.286	46.324	46.361	46.398	46.436	46.473	46.511	46.548	46.585	46.623
1140	46.623	46.660	46.697	46.735	46.772	46.809	46.847	46.884	46.921	46.958	46.995
1150	46.995	47.033	47.070	47.107	47.144	47.181	47.218	47.256	47.293	47.330	47.367
1160	47.367	47.404	47.441	47.478	47.515	47.552	47.589	47.626	47.663	47.700	47.737
1170	47.737	47.774	47.811	47.848	47.884	47.921	47.958	47.995	48.032	48.069	48.105
1180	48.105	48.142	48.179	48.216	48.252	48.289	48.326	48.363	48.399	48.436	48.473
1190	48.473	48.509	48.546	48.582	48.619	48.656	48.692	48.729	48.765	48.802	48.838

**Figura 38 - Tabela de conversão Tensão/Temperatura do termopar tipo K (parte 3/4).**

**TABELA 10 Termopar Tipo K**  
 Temperatura em Graus Celsius (ITS-90)

EMF em Milivolts										Junções à 0°C	
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VOLTAGEM TERMOELÉTRICA EM MILIVOLTS											
1200	48.838	48.875	48.911	48.948	48.984	49.021	49.057	49.093	49.130	49.166	49.202
1210	49.202	49.239	49.275	49.311	49.348	49.384	49.420	49.456	49.493	49.529	49.565
1220	49.565	49.601	49.637	49.674	49.710	49.746	49.782	49.818	49.854	49.890	49.926
1230	49.926	49.962	49.998	50.034	50.070	50.106	50.142	50.178	50.214	50.250	50.286
1240	50.286	50.322	50.358	50.393	50.429	50.465	50.501	50.537	50.572	50.608	50.644
1250	50.644	50.680	50.715	50.751	50.787	50.822	50.858	50.894	50.929	50.965	51.000
1260	51.000	51.036	51.071	51.107	51.142	51.178	51.213	51.249	51.284	51.320	51.355
1270	51.355	51.391	51.426	51.461	51.497	51.532	51.567	51.603	51.638	51.673	51.708
1280	51.708	51.744	51.779	51.814	51.849	51.885	51.920	51.955	51.990	52.025	52.060
1290	52.060	52.095	52.130	52.165	52.200	52.235	52.270	52.305	52.340	52.375	52.410
1300	52.410	52.445	52.480	52.515	52.550	52.585	52.620	52.654	52.689	52.724	52.759
1310	52.759	52.794	52.828	52.863	52.898	52.932	52.967	53.002	53.037	53.071	53.106
1320	53.106	53.140	53.175	53.210	53.244	53.279	53.313	53.348	53.382	53.417	53.451
1330	53.451	53.486	53.520	53.555	53.589	53.623	53.658	53.692	53.727	53.761	53.795
1340	53.795	53.830	53.864	53.898	53.932	53.967	54.001	54.035	54.069	54.104	54.138
1350	54.138	54.172	54.206	54.240	54.274	54.308	54.343	54.377	54.411	54.445	54.479
1360	54.479	54.513	54.547	54.581	54.615	54.649	54.683	54.717	54.751	54.785	54.819
1370	54.819	54.852	54.885								

**Figura 39 - Tabela de conversão Tensão/Temperatura do termopar tipo K (parte 4/4).**

