



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA**  
**ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA**

AMANDA CRISTINA VOLCE  
ERIK FIGUEIREDO DE OLIVEIRA

**MODELAGEM EXPERIMENTAL DO TEMPO DE HOMOGENEIZAÇÃO**  
**DA TEMPERATURA DE PEÇAS EM FORNO DE TRATAMENTO**  
**TÉRMICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

**CURITIBA**  
**2014**

**AMANDA CRISTINA VOLCE  
ERIK FIGUEIREDO DE OLIVEIRA**

**MODELAGEM EXPERIMENTAL DO TEMPO DE HOMOGENEIZAÇÃO  
DA TEMPERATURA DE PEÇAS EM FORNO DE TRATAMENTO  
TÉRMICO**

Projeto de Pesquisa apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova

**CURITIBA  
2014**

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Por meio deste termo, aprovamos a Proposta do Projeto de Pesquisa “MODELAGEM EXPERIMENTAL DO TEMPO DE HOMOGENEIZAÇÃO DA TEMPERATURA DE PEÇAS EM FORNO DE TRATAMENTO TÉRMICO”, realizada pelos alunos AMANDA CRISTINA VOLCE e ERIK FIGUEIREDO DE OLIVEIRA, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova  
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR  
Orientador

Prof.<sup>a</sup>. Dra. Marjorie Benegra  
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR  
Avaliadora

Prof. Dr. Ricardo Fernando dos Reis  
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR  
Avaliador

Curitiba, 10 de Março de 2014.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, por terem me educado, tornando possível ser o que sou hoje.

À Paula, sem você não só isso como todo o caminho pra chegar até aqui não seria possível, sempre apoiando e compreendendo. Enfim, muito obrigado polaca.

À Rose, obrigado por sempre estar disposta a ajudar, e por ter me permitido te conhecer.

**Erik**

Aos meus pais, por terem sempre acreditado em mim e sempre me apoiado em todas as decisões, mesmo nas mais difíceis, sempre demonstrando com gestos ou palavras muito amor.

Aos meus irmãos Andreia e Everson por estarem sempre dispostos a me ajudar.

Ao meu marido amado Hélio por estar sempre do meu lado me apoiando, dando força e principalmente muito incentivo, sempre com muita paciência e amor.

**Amanda**

Ao nosso orientador Professor Rodrigo Lupinacci Villanova, não apenas como orientador, mas também como amigo e motivador e por ter acreditado que este trabalho seria possível, mesmo quando nem nós acreditávamos, isso tudo sempre com muita paciência.

Ao Professor Paulo Henrique Dias dos Santos, por ter auxiliado quando as dúvidas surgiram.

A todos que participaram direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho, seja apoiando quando estávamos cansados ou agregando conhecimento que sempre foi bem vindo.

## RESUMO

VOLCE, Amanda C.; OLIVEIRA, Erik F., **Modelagem Experimental do Tempo de Homogeneização da Temperatura de Peças em Forno de Tratamento Térmico**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

O presente trabalho apresenta um problema típico na realização de tratamentos térmicos, que é a determinação do tempo necessário para a homogeneização da temperatura de peças no interior de fornos. Para isso, o trabalho foi dividido em duas etapas principais: a primeira consistiu em coletar os dados experimentais que serviram de base para a etapa seguinte, que foi a realização de um estudo visando à determinação, através do Teorema dos Pi de Buckingham, de uma função capaz de representar a relação entre o tempo de homogeneização da temperatura e as variáveis do processo de aquecimento, como geometria da peça e do forno, temperatura inicial da peça, temperatura desejada e as propriedades térmicas e dos materiais. Tendo em vista que existem diversos materiais e diversas geometrias para as peças e fornos são consideradas algumas hipóteses para a limitação do problema analisado.

**Palavras-chave:** Tempo, Homogeneização de temperatura, Pi de Buckingham.

## **ABSTRACT**

VOLCE, Amanda C.; OLIVEIRA, Erik F., **Experimental Modeling of the Time to Homogenization of Temperature of Parts in Heat Treatment Furnace**. Course Conclusion Project, Federal University of Technology - Paraná. Curitiba, 2014.

In this work, the determination of the time needed to achieve the temperature homogenization within the cross section of parts, which is a typical problem in heat treatment practice, is analyzed. Therefore, the work was divided into two main steps: gathering of experimental data, and the derivation of an equation that is able to determine the time needed to achieve the temperature homogenization as a function of process variables, such as part and furnace geometries, initial and final temperature of parts, and material thermal properties. Such equation was derived based on the Buckingham's Pi Theorem. Considering the existence of several different materials and geometries, some hypotheses were considered in order to limit the problem.

**Keywords:** Time, Homogenization of temperature, Buckingham Pi's Theorem.

“Não sabendo que era impossível, foi lá e fez.”  
(Jean Cocteau)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Associação da Transferência de calor por condução à difusão de energia devido à atividade molecular .....	17
Figura 2.2 - Tipos de transferência de calor por convecção: (a) Convecção forçada. (b) Convecção natural .....	20
Figura 2.3 - Relação deduzida experimentalmente entre os parâmetros adimensionais .....	23
Figura 2.4 - Influência do número de Biot na distribuição de temperaturas em estado estacionário em uma parede plana com convecção na superfície .....	26
Figura 3.1 – Amostra .....	31
Figura 3.2 - Termopar Tipo K .....	31
Figura 3.3 - Desenho esquemático do experimento .....	33
Figura 3.4 - Experimento .....	33

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Relação entre o tempo de homogeneização e o comprimento característico para as amostras de aço carbono AISI 1045 .....	41
Gráfico 4.2 - Relação entre o tempo de homogeneização e o comprimento característico para as amostras de aço inoxidável AISI 304 .....	42
Gráfico 4.3 - Relação entre o tempo de homogeneização e a temperatura para as amostras de aço carbono AISI 1045 .....	43
Gráfico 4.4 - Relação entre o tempo de homogeneização e a temperatura para as amostras de aço inoxidável AISI 304 .....	44
Gráfico 4.5 - Comparação entre os tempos para os diferentes materiais a 600°C variando o comprimento característico da amostra.....	45
Gráfico 4.6 - Comparação entre os tempos para os diferentes materiais a 700°C variando o comprimento característico da amostra.....	46
Gráfico 4.7 - Comparação entre os tempos para os diferentes materiais a 800°C variando o comprimento característico da amostra.....	46
Gráfico 4.8 - Comparação entre os tempos para os diferentes materiais a 900°C variando o comprimento característico da amostra.....	47
Gráfico 4.9 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Carbono com $L_{cp}=0,00554m$ . .....	56
Gráfico 4.10 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Carbono com $L_{cp}=0,00599m$ . .....	56
Gráfico 4.11 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Carbono com $L_{cp}=0,00624m$ . .....	57
Gráfico 4.12 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Carbono com $L_{cp}=0,0064m$ . .....	57
Gráfico 4.13 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Inoxidável com $L_{cp}=0,00554m$ . .....	58

Gráfico 4.14 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Inoxidável com $L_{cp}=0,00599m$ . .....	58
Gráfico 4.15 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Inoxidável com $L_{cp}=0,00624m$ . .....	59
Gráfico 4.16 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Inoxidável com $L_{cp}=0,0064m$ . .....	59
Gráfico C. 1 - Propriedades térmicas do Aço Carbono AISI 1045.....	85
Gráfico C. 2 - Propriedades térmicas do Aço Inoxidável AISI 304.....	85
Gráfico D. 1 - Relação obtida experimentalmente entre $-\ln(\theta^*)$ e tempo.....	88
Gráfico F. 1 - Tempo de Homogeneização da Temperatura Aço Carbono.....	94
Gráfico F. 2 - Tempo de Homogeneização da Temperatura Aço Inoxidável.....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Informações geométricas das amostras.....	30
Tabela 3.2 - Informações geométricas do forno .....	32
Tabela 3.3 - Dimensões das Variáveis no Sistema MLtT .....	35
Tabela 4.1 - Valores das Variáveis para Cada Experimento .....	49
Tabela 4.2 - Valores dos Grupos Pi .....	50
Tabela 4.3 – Comparação Entre o Tempo Medido e o Tempo Previsto Pelo Modelo, e Erro .....	53
Tabela 4.4 - Comparação Entre o Tempo Medido e o Tempo Calculado Pelo MCG, e Erro .....	54
Tabela B 1 - Resumo da Média dos Tempos de Homogeneização .....	68
Tabela B 2 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AC1.....	69
Tabela B 3 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AC2.....	70
Tabela B 4 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AC3.....	71
Tabela B 5 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AC4.....	72
Tabela B 6 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 600°C nas amostras de Aço Carbono .....	73
Tabela B 7 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 700°C nas amostras de Aço Carbono .....	74
Tabela B 8 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 800°C nas amostras de Aço Carbono .....	75
Tabela B 9 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 900°C nas amostras de Aço Carbono .....	76
Tabela B 10 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AI1 .....	77
Tabela B 11 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AI2 .....	78
Tabela B 12 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AI3 .....	79
Tabela B 13 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AI4 .....	80

Tabela B 14 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 600°C nas amostras de Aço Inoxidável .....	81
Tabela B 15 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 700°C nas amostras de Aço Inoxidável .....	82
Tabela B 16 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 800°C nas amostras de Aço Inoxidável .....	83
Tabela B 17 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 900°C nas amostras de Aço Inoxidável .....	84
Tabela C. 1 - Propriedades dos Materiais para Cada Ensaio.....	86
Tabela E. 1 - Escolha do Melhor Subconjunto.....	89
Tabela E. 2 - Coeficientes da Regressão Múltipla.....	89
Tabela E. 3 - Fator Inflacionário de Variância de $\Pi_2$ em relação aos demais.....	90
Tabela E. 4 - Fator Inflacionário de Variância de $\Pi_3$ em relação aos demais.....	90
Tabela E. 5 - Fator Inflacionário de Variância de $\Pi_4$ em relação aos demais.....	90
Tabela F. 1 - Tempo de Homogeneização da Temperatura.....	91

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Nome</b>	<b>Unidade</b>
$A_s$	Área Superficial	$m^2$
$Bi$	Número de Biot	—
$C_d$	Coeficiente de Arrasto	—
$C_p$	Calor Específico	$J/kg.K$
$D$	Diâmetro	$m$
$D_{esf}$	Diâmetro da Esfera	$m$
$\dot{E}$	Taxa de Energia	$W$
$F$	Força de Arrasto	$N$
$h$	Coeficiente Convectivo ou de Película	$W/m^2.K$
$K$	Condutividade Térmica	$W/m.K$
$L$	Comprimento	$m$
$L_c$	Comprimento Característico	$m$
$\dot{q}$	Taxa de Transferência de Calor	$W$
$R$	Resistência Térmica	$K/W$
$Re$	Número de Reynolds	—
$T$	Temperatura	$K$
$t$	Tempo	$s$
$U$	Velocidade do Escoamento	$m/s$
$V$	Volume	$m^3$
$\Delta$	Diferença	—

$\varepsilon$	Emissividade	—
$\mu$	Viscosidade Dinâmica	$N \cdot s / m^2$
$\rho$	Massa Específica	$kg / m^3$
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$W / m^2 K^4$
$d() / dt$	Taxa em Função do tempo	$1 / s$
$()_0$	Inicial	—
$()_1$	Final	—
$()_{acu}$	Interno	—
$()_{c,f}$	Característico do Forno	—
$()_{c,p}$	Característico da Peça	—
$()_{cond.}$	Condução	—
$()_{conv.}$	Convecção	—
$()_{ent}$	Entrando	—
$()_f$	Forno ou Final	—
$()_{rad}$	Radiação	—
$()_{s,c}$	Superfície do Corpo	—
$()_{sai}$	Saindo	—
$()_{viz}$	Vizinhança	—
$()_{\infty}$	Corrente Fluida	—

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS.**

- ANOVA - Análise de Variância
- DAMEC - Departamento Acadêmico de Mecânica
- FIV - Fator Inflacionário da Variância
- MCG - Método da Capacitância Global
- MLtT - Massa, Comprimento, Tempo e Temperatura
- SI - Sistema Internacional de Unidades
- UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Contexto	13
1.2	Problema	13
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específicos	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
2.1	Tratamento Térmico	15
2.2	Síntese de Balanço de Energia	15
2.3	Transferência de Calor	16
2.3.1	Condução	17
2.3.2	Convecção	19
2.3.3	Radiação	21
2.4	Síntese de Análise Dimensional	22
2.4.1	O Teorema dos Pi de Buckingham	23
2.5	Método da Capacitância Global	24
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>29</b>
3.1	Materiais	29
3.2	Metodologia	32
3.2.1	Fase Experimental	32
3.2.2	Fase da Análise Dimensional	34
3.2.3	Fase de Análise de Dados	38
3.2.4	Fase de Desenvolvimento e Comparação da Equação	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>40</b>
4.1	Influência das Variáveis do Processo no Tempo de Homogeneização	40
4.1.1	Influência do Comprimento Característico no Tempo de Homogeneização	40
4.1.2	Influência da Temperatura do Forno no Tempo de Homogeneização	42
4.1.3	Influência do Material da Amostra no Tempo de Homogeneização	45
4.2	Desenvolvimento da Equação do Tempo de Homogeneização da Temperatura	47
4.3	Solução do Método da Capacitância Global	53
4.4	Comparação Entre o Modelo Desenvolvido e a Solução do Método da Capacitância Global	55
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>63</b>
	<b>ANEXO A – TABELA DE CONVERSÃO DA TENSÃO EM TEMPERATURA PARA O TERMOPAR TIPO K</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE A – TABELA DE DADOS BRUTOS DOS EXPERIMENTOS</b>	<b>66</b>
	<b>APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA</b>	<b>68</b>
	<b>APÊNDICE C – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS</b>	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE D – DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE E – REGRESSÃO MÚLTIPLA</b>	<b>89</b>
	<b>APÊNDICE F – DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE HOMOGENEIZAÇÃO DA TEMPERATURA</b>	<b>91</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto

A amplitude da utilização de materiais metálicos é vastamente conhecida e difundida. A principal aplicabilidade para engenharia deste tipo de material está pautada nas suas propriedades mecânicas. No entanto, durante o processo de especificação das propriedades desejadas em uma peça, pode tornar-se necessária à realização de tratamentos térmicos para atingir determinadas propriedades ou conferir características desejadas, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento.

Dentre os tratamentos térmicos mais utilizados estão: recozimento, normalização, têmpera e revenido. Cada um destes tratamentos possui aplicações bem definidas, que conferem propriedades específicas ao material da peça.

O tempo de permanência da peça na temperatura desejada no interior do forno é uma variável importante para que se atinja o equilíbrio térmico em toda a seção da peça. Este tempo de permanência é a soma do tempo necessário para a homogeneização da temperatura na peça e o tempo para que ocorra a mudança de fase, como por exemplo, a completa austenitização de uma peça qualquer. A determinação deste tempo é obtida de diversas maneiras, muitas vezes arbitrárias, dependendo da situação, podendo levar a incorreções no processo.

## 1.2 Problema

Os processos envolvidos durante a fase de aquecimento, em um tratamento térmico, são transientes, ou seja, variam com o tempo. Visto que a dinâmica das indústrias necessita de controle e otimização de processo e que o tempo em tratamento térmico é uma variável importante que deve ser controlada para que não existam alterações nos resultados, como por exemplo, crescimento excessivo de grão no processo de austenitização. Fica evidenciado que uma relação entre o tempo e as demais variáveis do processo é útil e pode trazer benefícios aos usuários, seja na indústria ou no meio acadêmico.

Segundo Chiaverini (2012, p.83), a relação entre tempo, temperatura e as modificações estruturais, deve ser estritamente a necessária, e pelo menos suficiente para que seja atingida a homogeneidade de temperatura em toda a seção da peça.

O problema descrito como a homogeneização da temperatura ocorre em três dimensões e com propriedades variantes, fazendo com que a solução matemática da condução transiente, que é o fenômeno predominante no processo de homogeneização da temperatura nas peças, seja complexa e onerosa, necessitando de conhecimentos específicos na área de transferência de calor para sua solução. De modo geral, a solução analítica implica na utilização de diversas hipóteses simplificadoras, que introduzem erros no resultado final.

Outra maneira de solucionar tal problema é a utilização de métodos computacionais, que também necessitam de conhecimentos específicos, não apenas na área de transferência de calor, como também na área de métodos numéricos.

Ambas as soluções quando compreendem todo o problema, além de complexas são também demoradas e assim de alto custo para serem realizadas corriqueiramente nas indústrias ou até mesmo no meio acadêmico.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

Desenvolver uma equação, baseada em ensaios experimentais e no Teorema dos Pi de Buckingham, capaz de fornecer o tempo necessário para homogeneização de temperatura em peças no interior de fornos de tratamento térmico.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Desenvolver uma equação capaz de fornecer o tempo necessário para homogeneização de temperaturas em peças cilíndricas com diferentes relações volume e área superficial, e de diferentes materiais;
- Comparar os resultados da equação desenvolvida empiricamente com a solução algébrica do Método da Capacitância Global.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As pesquisas com intuito de encontrar formulações já realizadas que auxiliem ou até mesmo forneçam as informações necessárias para a obtenção do tempo de homogeneização da temperatura de peças em fornos de tratamento térmico foram infrutíferas, ou apresentaram resultados sem fundamentação suficiente para ser utilizado como referência para este trabalho, como por exemplo, algumas destas referências como catálogos de acearias e alguns professores de ensino superior indicam que para cada polegada da seção da peça, deve-se mantê-la durante 30 minutos no interior do forno.

Sendo assim, neste capítulo é realizada uma revisão da literatura dos assuntos fundamentais para a compreensão e realização deste trabalho. Em ordem serão apresentados: tratamento térmico, síntese de balanço de energia, transferência de calor e síntese de análise dimensional.

### 2.1 Tratamento Térmico

Para Chiaverini (2012, p.82), tratamento térmico pode ser definido como um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento aos quais são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento. Alguns dos principais objetivos são: remoção de tensões, aumento ou diminuição da dureza, aumento da resistência mecânica, modificação das propriedades elétricas e magnéticas, além da melhora da ductilidade, usinabilidade, resistência ao desgaste, propriedades de corte, resistência à corrosão e resistência ao calor. (CHIAVERINI, 2012).

Os fenômenos dinâmicos envolvidos em um tratamento térmico estão fortemente relacionados com os efeitos da transferência de calor no processo e seus parâmetros, temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento.

### 2.2 Síntese de Balanço de Energia

Para Moran e Shapiro (2002, p.1), o primeiro passo para qualquer análise de engenharia consiste em descrever precisamente o que será estudado. Assim o objeto da análise em termodinâmica é definido como sistema, e pode ser caracterizado em sistema aberto ou fechado.

Çengel e Boles (2001, p.9), definem sistema fechado como sendo aquele em que a massa não ultrapassa a fronteira do sistema, no entanto o calor e o trabalho o

fazem. Além disso, os autores também inferem que o volume neste tipo de sistema pode variar.

A principal diferença indicada por Çengel e Boles (2001, p.9), entre o sistema fechado e o sistema aberto, é o fato de que no sistema aberto tanto energia quanto massa podem atravessar as fronteiras do sistema.

“As relações termodinâmicas que se utilizam para sistemas aberto e fechado são diferentes. Portanto, é extremamente importante reconhecer o tipo de sistema antes de iniciar o estudo” (ÇENGEL e BOLES, 2001, p.9).

Deste modo, ser capaz de quantificar e identificar o fluxo de energia presente em um estudo é essencial, para isso o balanço de energia em sistemas fechados equaciona as grandezas envolvidas pela inferência da conservação da energia total.

Para Moran e Shapiro (2002, p.36), a variação da quantidade de energia em um sistema durante um intervalo de tempo é igual à quantidade líquida de energia transferida para o sistema na forma de calor menos a quantidade líquida de energia transferida do sistema na forma de trabalho, no mesmo intervalo de tempo. Este conceito é denominado balanço de energia.

### **2.3 Transferência de Calor**

Sendo parâmetros importantes no tratamento térmico as temperaturas envolvidas e o tempo, pode-se então caracterizar a ocorrência da transferência de calor durante o processo. “Transferência de calor é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço.” (INCROPERA *et al.*, 2012).

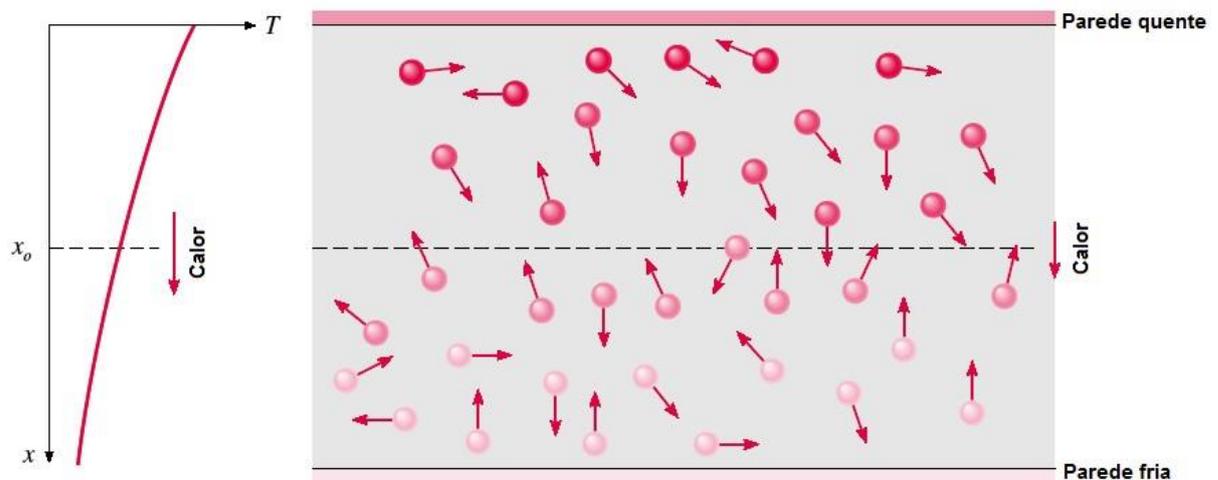
Com os conhecimentos adquiridos em termodinâmica é então possível realizar a afirmação de que energia pode ser transferida na forma de calor ou trabalho, de um corpo para a sua vizinhança ou vice-versa. No entanto a aplicação em termodinâmica apenas fornece as interações globais, como balanços de massa e energia. A análise dos mecanismos envolvidos e a taxa com que a energia se transfere são obtidas em transferência de calor, ou simplesmente calor.

A ocorrência da transferência de calor pode ser de diferentes modos. Para a simplificação do entendimento do fenômeno como um todo, inicialmente serão apresentados separadamente cada um destes modos que são: condução, convecção e radiação térmica.

### 2.3.1 Condução

Incropera *et al.* (2012, p.2) admitem que condução está explicitamente relacionada com a atividade atômica e molecular, pois é através deste mecanismo que a condução se sustenta. Podendo a condução ser caracterizada pela transferência de calor das partículas com maior energia para as de menor energia. Trazendo aqui o conceito de temperatura, que se define como o nível de energia das moléculas, ou seja, as partículas com maior energia estão relacionadas às que possuem maior temperatura, o oposto também é verificado.

Eles ainda descrevem tal fenômeno, quantificando e indicando a direção que a energia se desloca. A quantificação é dada pela proporcionalidade da diferença de temperatura e a distância entre moléculas em um corpo em estado sólido ou fluido, e o calor flui das com maior temperatura para as de menor temperatura, conforme ilustrado na Figura 2.1.



**Figura 2.1 - Associação da Transferência de calor por condução à difusão de energia devido à atividade molecular**

**Fonte: INCROPERA *et al.* (2012)**

Tal enunciado, quando relacionado com o tempo, é transcrito na forma da Lei de Fourier, na qual é possível quantificar a quantidade de energia transferida por unidade de tempo, sob uma determinada regra de proporção, visto que a mesma é resultado de experimentalismo, não tendo sido gerada através de um princípio fundamental (INCROPERA *et al.*, 2012).

A proporcionalidade é dada pelo produto entre uma propriedade térmica do material conhecida como condutividade térmica e a área perpendicular à direção do calor. Para Callister e Rethwisch (2012, p. 673) a condutividade térmica está relacionada à dificuldade ou facilidade que um dado material possui para transferir calor por condução.

Em termos de condução de calor, também é importante ressaltar que um material, quando aquecido, experimenta um aumento na temperatura, o que significa que alguma energia foi absorvida. A capacidade calorífica é uma propriedade que representa a quantidade de energia necessária para produzir um aumento unitário na temperatura (CALLISTER e RETHWISCH, 2012). Na maioria das vezes a capacidade calorífica é reescrita por unidade de massa, sendo então chamada de calor específico.

O produto entre calor específico e a massa específica do material, é comumente chamado de capacidade calorífica volumétrica. E a razão entre a condutividade térmica e capacidade calorífica volumétrica é uma importante propriedade denominada difusividade térmica. Segundo Incropera *et al.* (2012, p. 43) tal propriedade nos fornece a capacidade de condução térmica de um material em relação a sua capacidade de armazenar energia, ou seja, quanto maior for o valor da difusividade térmica mais rápida será a resposta a alterações nas condições térmicas.

Além disso, também é importante salientar que tais propriedades dependem da temperatura na qual o material se encontra, e que geralmente são realizadas algumas considerações para valores constantes a fim de simplificar a solução de problemas. Apesar da simplicidade aparente, os modelos por estas simplificações representados podem ser usados para representar, com precisão, numerosos sistemas de engenharia (INCROPERA *et al.*, 2012).

Em muitos casos nos quais é uma boa aproximação considerar que o fenômeno da condução térmica ocorre em regime permanente, esta aproximação é realizada, pois a complexidade da solução quando todas as variações são admitidas, inclusive as temporais, onera excessivamente o trabalho.

Para Incropera *et al.*(2012, p. 63) a condução em regime estacionário é caracterizada pelo fato da temperatura em cada ponto ser independente do tempo.

Ainda abordando a condução, existem problemas que necessitam de uma análise pautada nas variações temporais, são os problemas de condução em regime

transiente. Segundo Bejan (1996, p.114) este tipo de problema possui grande relevância em muitas áreas, por exemplo, nos tratamentos térmicos de metais e na refrigeração de imãs supercondutores.

Mesmo em situações que este é o caso representativo, algumas simplificações necessitam ser realizadas, como a de uniformidade de temperatura no início do processo, e de que as propriedades do material sejam independentes da temperatura. Novamente estas são maneiras de desenvolver soluções com níveis mais baixos de complexidade.

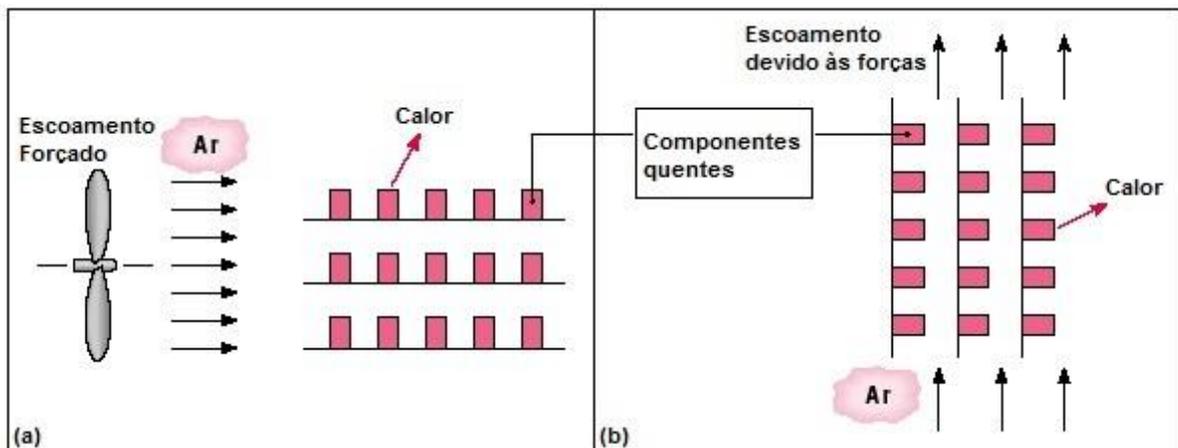
Um método amplamente utilizado na solução analítica desta gama de problemas, de regime transiente, é denominado como método da capacitância global, que segundo Incropera *et al.*, (2012, p.163) necessita de algumas considerações para ser aplicado, a principal delas e que remete às demais infere que o gradiente de temperatura no interior do corpo sólido deve ser inexistente. Esta condição é claramente impossível, pois implicaria em uma condutividade infinita, no entanto para que esta consideração seja suficientemente boa, deve-se admitir que a resistência à condução no interior do sólido seja muito pequena se comparada à resistência a transferência de calor nas vizinhanças do sólido.

Além disso, os autores ainda indicam que ao desprezar o gradiente de temperatura no interior da peça, não é mais possível resolver tal problema pelo equacionamento básico da condução de calor, mas sim por uma análise global da energia envolvida.

### **2.3.2 Convecção**

Bejan (1996, p.18) infere que o modo de transferência de calor por convecção é o modo de transferência de calor no qual um fluido escoando atua como transportador da energia que é transferida do corpo (ou para o corpo). Assim um processo convectivo é a soma de duas parcelas de transferência de energia, uma através do movimento global do fluido, definido como advecção e outro pelo movimento aleatório das moléculas do fluido, que como já visto anteriormente é denominado condução (INCROPERA *et al.*, 2012).

O modo convecção de transferência de calor pode ser subdividido em dois tipos principais: convecção forçada e convecção natural, ambos estão representados na Figura 2.2 (a) e (b), respectivamente.



**Figura 2.2 - Tipos de transferência de calor por convecção: (a) Convecção forçada. (b) Convecção natural**

**Fonte: INCROPERA et al. (2012)**

A convecção forçada é caracterizada pela ação de um agente externo que fornece a energia do movimento do fluido, por exemplo, ventiladores, bombas, ventos atmosféricos e outros (INCROPERA et al., 2012).

A convecção denominada natural caracteriza-se opostamente à convecção forçada, pelo fato que a energia do movimento do fluido não mais é fornecida por um agente externo, mas sim proveniente das forças de empuxo que são originárias das diferenças de massa específica do fluido, causadas pela variação de temperatura (BEJAN, 1996).

Assim como foi indicado na condução a existência de uma proporcionalidade entre o calor transferido e a diferença de temperatura das moléculas, na convecção analogamente uma proporcionalidade que relaciona o calor transferido, entre o fluido e o corpo sólido, independentemente da direção, e a diferença de temperatura entre os mesmos, é conhecido como resistência térmica por convecção, que é o igual ao produto da área em que ocorre a transferência de calor e o coeficiente convectivo (BEJAN, 1996).

Para Bejan (1996, p.19), o coeficiente convectivo sofre influencia das características do escoamento, por exemplo, geometria da superfície, tipo de convecção além de uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido.

Também analogamente a Lei de Fourier para a condução para a convecção a lei que rege o fenômeno é denominada Lei do Resfriamento de Newton indicado na equação 2.1. (INCROPERA *et al.*, 2012).

$$\dot{q}_{conv} = hA_s\Delta T$$

Onde:

**Eq. (2.1)**

$A_s$  = Área superficial [  $m^2$  ];

$\Delta T$  = Diferença de temperatura entre a corrente fluída e a superfície do corpo [K];

$h$  = Coeficiente convectivo ou de película [  $W/m^2K$  ];

$\dot{q}_{conv}$  = Taxa de transferência de calor por convecção [  $W$  ].

### 2.3.3 Radiação

Diferentemente da transferência de calor por condução e convecção, em que um meio físico é necessário para que o fenômeno ocorra, na radiação a transferência de calor não necessita de um meio físico, ao contrário, o processo é mais eficiente no vácuo, pois o principal meio de transferência de energia é realizado através de ondas eletromagnéticas (INCROPERA *et al.*, 2012).

Neste modo de transferência de calor, vários aspectos anteriormente simplificados, não podem mais ser desprezados, grande parte destes estão fundamentados na óptica, como por exemplo, o posicionamento de um corpo em relação às vizinhanças e a capacidade de transferência de calor em três dimensões (BEJAN, 1996).

Apesar das diferenças em relação à condução e a convecção, também na radiação uma proporcionalidade é observada entre o calor transferido e a temperatura dos corpos envolvidos. Tal proporcionalidade é dada pela capacidade dos corpos envolvidos em absorver e emitir radiação, além da área em que isso ocorre (BEJAN, 1996).

Estas propriedades são inerentes ao processo em desenvolvimento, ou seja, dependem de muitas variáveis, por exemplo, temperaturas, geometrias, posições, meio entre outras. Uma destas propriedades é denominada emissividade e outra a absorvidade, esta última que determina a fração da irradiação que é absorvida pelo corpo (INCROPERA *et al.*, 2012).

A equação que rege a transferência de calor por radiação é:

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_{viz}^4 - T_{s,c}^4)$$

Onde:

**Eq. (2.2)**

$\dot{q}_{rad}$  = Taxa de transferência de calor por radiação [  $W$  ];

$A_s$  = Área superficial [  $m^2$  ];

$T_{s,c}$  = Temperatura da superfície do corpo [  $K$  ];

$\varepsilon$  = Emissividade [ 1 ];

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$T_{viz}$  = Temperatura da vizinhança radiante [  $K$  ];

## 2.4 Síntese de Análise Dimensional

Soluções analíticas demandam simplicidade do problema, tanto das geometrias envolvidas como das condições de contorno aplicadas. No entanto, poucos problemas podem ser resolvidos dessa forma, uma vez que a maioria das situações práticas são complexas sob o ponto de vista geométrico e físico, e através de experimentos torna-se mais simples o registro do seu comportamento. Sendo assim, é necessário que sejam adotadas metodologias para que os dados obtidos através dos experimentos forneçam resultados satisfatórios. Uma metodologia que pode ser empregada nestes casos é a análise dimensional (WHITE, 2002).

“Basicamente, a análise dimensional é um métodos para se reduzir o número e a complexidade das variáveis que afetam um dado fenômeno físico, pela aplicação de uma espécie de técnica de compactação” (WHITE, 2002, p.195).

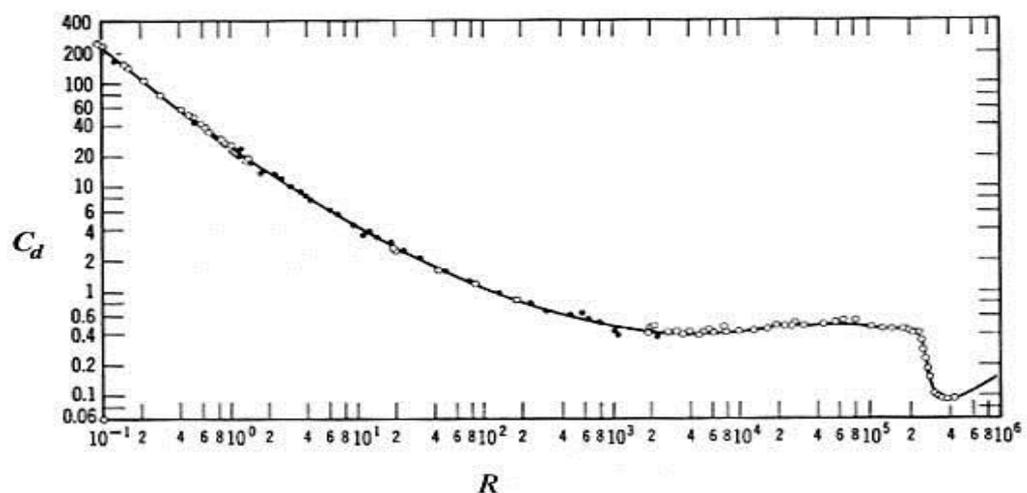
A aplicação da análise dimensional implica na redução do número de variáveis dimensionais das quais depende um fenômeno, à um número menor de variáveis adimensionais, sendo este número de variáveis adimensionais dependente da complexidade do problema (WHITE, 2002).

Uma maneira de realizar esta redução da quantidade de variáveis dimensionais de um problema a uma quantidade menor de variáveis adimensionais é através do Teorema dos Pi de Buckingham.

### 2.4.1 O Teorema dos Pi de Buckingham

Para Buckingham, a afirmação de Fourier de que toda equação física corretamente desenvolvida é dimensionalmente homogênea e que todos os termos desta equação devem ter as mesmas dimensões, foi a primeira. Sendo assim, uma equação completa capaz de representar um fenômeno físico pode ser obtida através da redução do número de variáveis dimensionais a um número menor de grupos adimensionais, tendo estes grupos a forma de um produto de potências das variáveis dimensionais, definidos como Pi's. Este princípio, proposto por Edgar Buckingham em 1914, é denominado Teorema dos Pi de Buckingham (WHITE, 2002).

Ressaltando a importância do método e demonstrando que diversos fenômenos podem ser representados por números adimensionais, é exemplificada por Fox, McDonald e Pritchard (2010, p.259) a relação entre o coeficiente de arrasto ( $C_d$ ) e o número de Reynolds ( $Re$ ), neste caso para a representação de um problema de dinâmica dos fluídos, na qual se estabelece um procedimento experimental para a medição da dependência da força de arrasto em uma esfera em relação aos demais parâmetros envolvidos. A curva obtida desta relação experimental é apresentada na Figura 2.3.



**Figura 2.3 - Relação deduzida experimentalmente entre os parâmetros adimensionais**

**Fonte: FOX, McDONALD e PRITCHARD (2010)**

Os parâmetros do processo, ou seja, aqueles que podem ser variados são a força de arrasto, as propriedades físicas do fluído, a velocidade do fluído escoando e

o diâmetro da esfera. Assim é fácil a constatação que um grande número de experimentos devem ser realizados para a obtenção de um resultado relevante, podendo ser simplificado pela aplicação do Teorema dos Pi de Buckingham. Assim o fenômeno pode ser representado por apenas dois grupos adimensionais que relacionam os parâmetros do processo. A forma pela qual estes grupos adimensionais se relacionam é obtida através dos experimentos.

Para este problema da força de arrasto em uma esfera, os dois grupos adimensionais obtidos pelo teorema são:

$$\Pi_1 = \frac{F}{\rho U^2 D_{esf}^2} = C_d$$

Eq. (2.3a)

$$\Pi_2 = \frac{\rho U D_{esf}}{\mu} = Re$$

Eq. (2.3b)

Onde:

 $C_d$  = Coeficiente de Arrasto [1]; $F$  = Força de Arrasto [N]; $Re$  = Número de Reynolds [1]; $U$  = Velocidade do Escoamento [ m/s ]; $\rho$  = Massa Específica [ kg/m<sup>3</sup> ]; $D_{esf}$  = Diâmetro da Esfera [ m ]; $\mu$  = Viscosidade Dinâmica [ N·s/m<sup>2</sup>];

De modo que:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2)$$

Eq. (2.4)

## 2.5 Método da Capacitância Global

Para Incropera *et al.* (2012, p.163), a essência do método da capacitância global esta na hipótese de que para qualquer instante a temperatura do sólido é uniforme no espaço; para isso, é inferido por eles que os gradientes de temperatura no interior dos sólidos sejam desprezíveis.

Tal hipótese apenas é verificada quando o número de Biot, que representa a relação entre as resistências térmicas por condução e por convecção, de acordo

com a equação 2.5, apresentar um valor muito menor do que um. Quando isto ocorre significa que a resistência à condução térmica no interior do sólido é muito menor do que a resistência à convecção através da camada limite no fluido.

$$\frac{R_{condução}}{R_{convecção}} = \frac{hL_c}{k} \equiv Bi \ll 1$$

Onde:

**Eq. (2.5)**

$R_{condução}$  = Resistência Térmica por Condução [K/W];

$R_{convecção}$  = Resistência Térmica por Convecção [K/W];

$h$  = Coeficiente Convectivo ou de Película [ W/m<sup>2</sup>K ];

$k$  = Condutividade Térmica [ W/mK ];

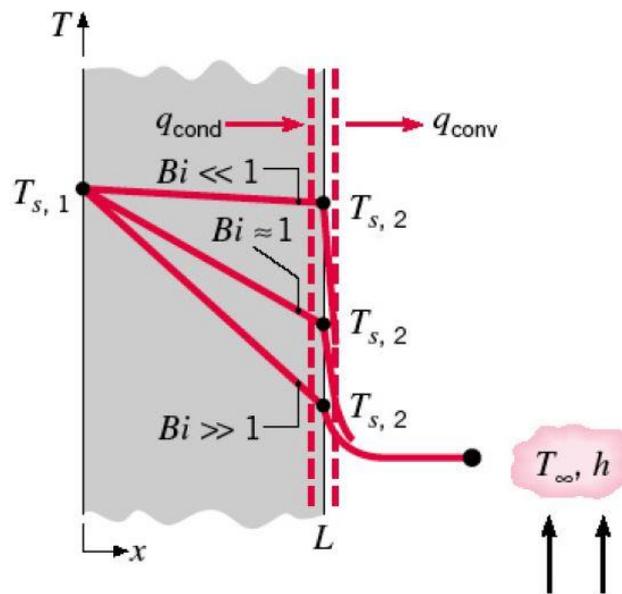
$L_c$  = Comprimento Característico [ m ]<sup>1</sup>;

$Bi$  = Número de Biot [ 1 ];

A figura 2.4 apresenta a distribuição da temperatura em estado estacionário quanto à variação do número de Biot, de modo a simplificar o entendimento da sua influência sobre o gradiente espacial de temperatura.

---

<sup>1</sup> O comprimento característico usualmente utilizado em transferência de calor é definido como sendo a razão entre o volume de um sólido e sua área superficial.



**Figura 2.4 - Influência do número de Biot na distribuição de temperaturas em estado estacionário em uma parede plana com convecção na superfície.**

**Fonte: INCROPERA et al. (2012)**

Ao realizar a aplicação de tal hipótese, não é mais possível resolver o problema através da equação do calor, sendo então necessária a realização de um balanço de energia no sólido, para a obtenção da resposta transiente da temperatura. Este balanço de energia deve considerar a taxa de calor transferido através da superfície e a taxa de variação da energia interna e pode ser representado pela Equação (2.6a) para um corpo submetido a aquecimento, e pela Equação (2.6b) para um corpo submetido a resfriamento (INCROPERA et al., 2012).

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{acu}$$

**Eq. (2.6a)**

$$-\dot{E}_{sai} = \dot{E}_{acu}$$

**Eq. (2.6b)**

Onde:

$\dot{E}_{ent}$  = Calor sendo transferido para o sólido [ W ];

$\dot{E}_{sai}$  = Calor sendo transferido do sólido [ W ];

$\dot{E}_{acu}$  = Energia interna [ W ].

O calor transferido, indicado no balanço de energia representado pelas Equações (2.6a) e (2.6b), pode ser produto de diferentes modos de transferência de calor, bem como combinações dos mesmos.

Para o caso onde calor é transferido por convecção e radiação em regime transiente, para o corpo (aquecimento), convenientemente escolhido por ser o problema analisado neste trabalho, são aplicadas as seguintes hipóteses:

1. A temperatura da corrente fluída é aproximadamente igual à temperatura da vizinhança radiante ( $T_\infty \approx T_{viz}$ );
2. Propriedades térmicas constantes à temperatura de filme<sup>2</sup>;

Então através da realização de um balanço de energia, tem-se:

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{acu}$$

$$\dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} = \dot{E}_{acu}$$

Sabendo que  $\dot{q}_{conv} = hA_s(T_\infty - T)$ , que  $\dot{q}_{rad} = \varepsilon\sigma A_s(T_{viz}^4 - T^4)$  e que  $\dot{E}_{acu} = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ , vem:

$$[h(T_\infty - T) + \varepsilon\sigma(T_{viz}^4 - T^4)]A_s = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$h(T_\infty - T) + \varepsilon\sigma(T_{viz}^4 - T^4) = \frac{\rho V c_p}{A_s} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Como  $L_c = \frac{V}{A_s}$ , então:

$$h(T_\infty - T) + \varepsilon\sigma(T_{viz}^4 - T^4) = \rho L_c c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Integrando:

$$\int_{T_0}^{T_1} \frac{\rho L_c c_p}{h(T_\infty - T) + \varepsilon\sigma(T_{viz}^4 - T^4)} dT = \int_0^t dt$$

---

<sup>2</sup> Temperatura de filme é a média entre a temperatura da superfície do sólido e a temperatura do fluído na corrente livre (BEJAN, 1996)

$$t = \int_{T_0}^{T_1} \frac{\rho L_c c_p}{h(T_\infty - T) + \varepsilon \sigma (T_{viz}^4 - T^4)} dT$$

Onde:

**Eq. (2.7)**

$\dot{E}_{ent}$  = Calor sendo transferido para o sólido [ W ];

$\dot{E}_{acu}$  = Energia interna [ W ];

$\dot{q}_{conv}$  = Taxa de transferência de calor por convecção [ W ];

$\dot{q}_{rad}$  = Taxa de transferência de calor por radiação [ W ];

$h$  = Coeficiente Convectivo ou de Película [ W/m<sup>2</sup>K ];

$A_s$  = Área superficial [ m<sup>2</sup> ];

$T_\infty$  = Temperatura da corrente fluída [K];

$T$  = Temperatura no interior do sólido em qualquer instante de tempo [K];

$\varepsilon$  = Emissividade [ 1 ];

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$T_{viz}$  = Temperatura da vizinhança radiante [K];

$\rho$  = Massa Específica [ kg/m<sup>3</sup> ];

$c_p$  = Calor específico [ J/kgK ];

$V$  = Volume [ m<sup>3</sup> ];

$\frac{\partial T}{\partial t}$  = Taxa da variação da temperatura [ K/s ];

$L_c$  = Comprimento Característico [ m ];

$T_0$  = Temperatura inicial [K];

$T_1$  = Temperatura final [K];

$t$  = Tempo [s].

A equação 2.7 é utilizada para a determinação analítica do tempo que um determinado sólido leva para variar sua temperatura, de uma temperatura inicial até uma temperatura final, quando submetido a aquecimento por radiação e convecção. Esta equação é obtida através da aplicação do método da capacitância global.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados os materiais a serem utilizados e a metodologia desenvolvida durante a execução do trabalho.

#### 3.1 Materiais

Os materiais e equipamentos utilizados nos experimentos foram os seguintes: aço AISI 1045 e aço inoxidável AISI 304, termopar tipo K, multímetro, cronômetro e forno.

As barras de aço serviram de amostras para o experimento. Elas têm geometria cilíndrica e foram preparadas no laboratório de fabricação da UTFPR.

Como discutido anteriormente, o fator geométrico tem muita relevância na análise a ser realizada. Sendo assim, torna-se necessária a definição de uma dimensão capaz de representar a geometria da peça como um todo. Em problemas de transferência de calor, usualmente esta dimensão é denominada comprimento característico ( $L_c$ ). A definição que será utilizada neste trabalho para sua determinação é mostrada na Eq. (3.1).

$$L_c = \frac{V}{A_s}$$

Onde:

**Eq. (3.1)**

$L_c$  = Comprimento característico [m];

$V$  = Volume [  $m^3$  ];

$A_s$  = Área superficial [  $m^2$  ].

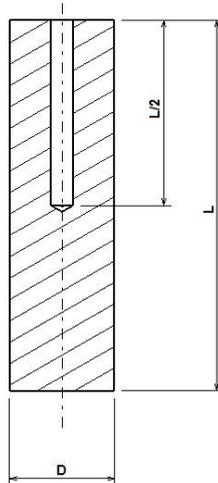
Assim, foram preparadas oito amostras, sendo quatro de aço AISI 1045 e quatro de aço AISI 304, as amostras de cada um dos materiais foram retiradas de uma única barra, a fim de assegurar uma maior homogeneidade das propriedades dos materiais. As dimensões de cada amostra bem como uma codificação que serve de referência para este trabalho são apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Informações geométricas das amostras

Material	Diâmetro (D) [mm]	Altura (H) [mm]	Comprimento Característico (Lc) [mm]	Código da Amostra
<b>Aço Carbono (AISI 1045)</b>	28,5	50	5,54	AC1
	28,5	75	5,99	AC2
	28,5	100	6,24	AC3
	28,5	125	6,40	AC4
<b>Aço Inoxidável (AISI 304)</b>	64	17	5,54	AI1
	50	23	5,99	AI2
	50,8	25	6,24	AI3
	50	26	6,40	AI4

A preparação das amostras foi realizada de modo que aos pares, quanto aos materiais, as geometrias apresentassem comprimentos característicos aproximadamente iguais, tornando possível que na fase de análise dos dados os resultados pudessem ser comparados.

Foram realizados furos, com diâmetro de 7mm, na linha de centro de cada uma das amostras até a metade de seu comprimento, conforme mostrado na Figura 3.1. Tal procedimento foi realizado para possibilitar a medição da temperatura no interior da peça.



**Figura 3.1 – Amostra**

O termopar tipo K, cujo comprimento e diâmetro da haste são de 500mm e 6mm respectivamente, ligado ao multímetro, foi utilizado para medir a temperatura no interior das amostras.



**Figura 3.2 - Termopar Tipo K**

O forno utilizado foi o Jung, modelo 0612 do laboratório de tratamentos térmicos da UTFPR e sua função foi a de fonte de calor para os experimentos. As dimensões do forno estão apresentadas na tabela 3.2.

**Tabela 3.2 - Informações geométricas do forno**

<b>Altura [mm]</b>	<b>Largura [mm]</b>	<b>Profundidade [mm]</b>	<b>Comprimento Característico [mm]</b>
150	150	300	30

## **3.2 Metodologia**

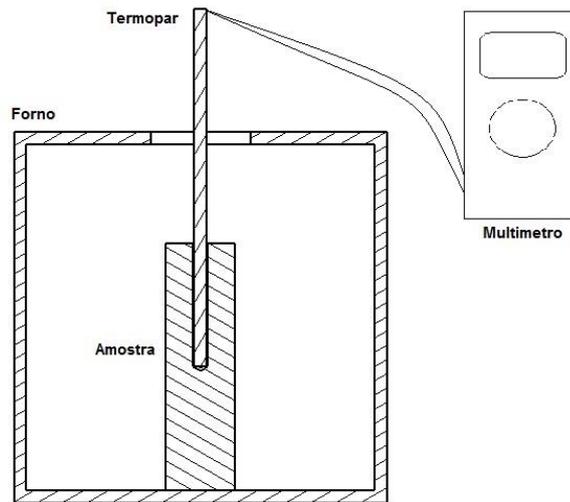
O trabalho foi desenvolvido em quatro etapas fundamentais, a saber: coleta experimental de dados, análise dimensional, análise de dados e desenvolvimento e comparação com o resultado obtido pelo método da capacitância global, da equação capaz de fornecer o tempo de homogeneização da temperatura das peças no interior do forno de tratamento térmico.

### **3.2.1 Fase Experimental**

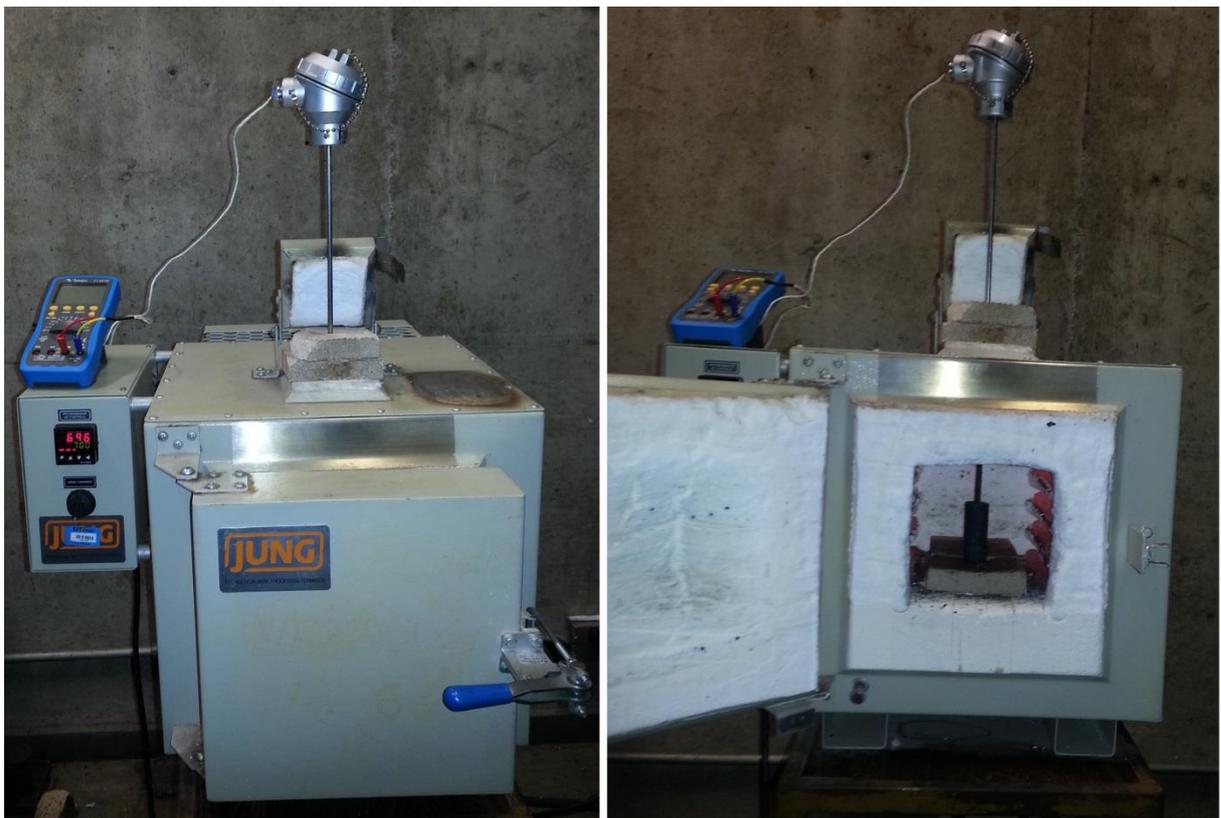
Para a realização desta fase foram determinadas quatro temperaturas, as quais se deseja analisar o tempo de homogeneização da temperatura em cada uma das amostras, sendo estas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C. Também foi definido que a temperatura inicial das peças padrão, tomada como referência é de 20°C.

De modo a reduzir a variação da temperatura com as amostras no interior do forno, antes de colocar a peça no interior do forno e realizar a medição aguardava-se a estabilização da temperatura para o experimento dentro de uma faixa de  $\pm 5^\circ\text{C}$ , para tanto se utilizava da indicação do mostrador digital do forno.

Em seguida, uma a uma as amostras foram colocadas no interior do forno de tratamento térmico, o qual possui uma abertura superior que serviu para o posicionamento do termopar no centro da peça, sendo a temperatura medida através do multímetro, conforme esquema das figuras 3.3 e 3.4.



**Figura 3.3 - Desenho esquemático do experimento**



**Figura 3.4 - Experimento**

Para a medição da temperatura, optou-se por realiza-la através da diferença de potencial gerada pelo termopar, deste modo efetivamente o que se mediu no multímetro foi a diferença de potencial que, através da tabela apresentada no anexo A, pode ser convertida em temperatura em graus Celsius. Para tanto se convertia a diferença entre a temperatura desejada e a temperatura medida no ambiente, para a

sua equivalência em miliVolt (mV). Assim, após o fechamento da porta do forno, se iniciou a contagem de tempo através do cronômetro, até que a tensão medida no multímetro se igualasse a tensão equivalente a temperatura desejada.

Este ciclo se repetiu quatro vezes para cada amostra para cada temperatura, totalizando 128 ensaios. Os dados obtidos com a realização dos experimentos estão apresentados no apêndice A.

### 3.2.2 Fase da Análise Dimensional

Nesta etapa o objetivo foi seguir os passos indicados para a utilização do Teorema dos Pi de Buckingham, que segundo White (2002, p.201) são:

Passo 1: Listar as  $n$  variáveis do problema;

No fenômeno de aquecimento de uma peça no interior de um forno, estão envolvidas nove variáveis, que são:

- $c_p$  = Calor Específico [ $J/kgK$ ];
- $h$  = Coeficiente Convectivo ou de Película [ $W/m^2K$ ];
- $k$  = Condutividade Térmica [ $W/mK$ ];
- $\rho$  = Massa Específica [ $kg/m^3$ ];
- $L_{c,f}$  = Comprimento Característico do forno [ $m$ ];
- $L_{c,p}$  = Comprimento Característico da peça [ $m$ ];
- $T_0$  = Temperatura inicial da peça [ $K$ ];
- $T_f$  = Temperatura do forno ou final [ $K$ ];
- $t$  = Tempo [ $s$ ].

Passo 2: Listar as dimensões de cada variável de acordo com o sistema de dimensões MLtT;

As dimensões de cada variável, no sistema de dimensões massa, comprimento, tempo e temperatura (MLtT), do fenômeno analisado, estão descritas na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Dimensões das Variáveis no Sistema MLtT

Grandeza	Símbolo	Dimensões no MLtT
Calor específico	$c_p$	$L^2/t^2T$
Coeficiente convectivo ou de película	$h$	$M/t^3T$
Condutividade térmica	$k$	$ML/t^3T$
Massa específica	$\rho$	$M/L^3$
Comprimento característico do forno	$L_{c,f}$	$L$
Comprimento característico da peça	$L_{c,p}$	$L$
Temperatura inicial da peça	$T_0$	$T$
Temperatura do forno ou final	$T_f$	$T$
Tempo	$t$	$t$

Passo 3: Encontrar  $j$  variáveis que não formem um produto  $\Pi$  entre si, de modo que  $j$  seja no máximo igual ao número de dimensões utilizadas no passo anterior, caso contrário à solução encontrada pode não representar o fenômeno. Além disso, estas variáveis devem ser facilmente obtidas, pois, aparecerão em todos os grupos  $\Pi_i$ ;

De acordo com o passo anterior, foram utilizadas quatro dimensões para descrever todas as variáveis do fenômeno, assim foram escolhidas quatro variáveis dentre as variáveis do problema, que são: a condutividade térmica ( $k$ ), a massa específica ( $\rho$ ), o comprimento característico da peça ( $L_{c,p}$ ) e a temperatura do forno ( $T_f$ ).

Estas variáveis foram escolhidas por serem facilmente obtidas através de tabelas ou até mesmo serem motivadoras do problema, como é o caso da temperatura do forno e do comprimento característico da peça. De modo que a sua aparição em todos os grupos  $\Pi_i$  formados não prejudica o desenvolvimento experimental do problema.

Além disso, estas variáveis não formam grupos adimensionais entre si como demonstrado em seguida.

Se o produto das potências dessas variáveis for igual a um e sobrem ao menos duas variáveis, cujos expoentes não sejam iguais à zero, significaria que as variáveis formam um grupo Pi adimensional entre si, o que é indesejado, assim:

$$T_f^a \cdot L_{c,p}^b \cdot k^c \cdot \rho^d = 1$$

No sistema de dimensões MLtT:

$$T^a \cdot L^b \cdot \left(\frac{ML}{t^3T}\right)^c \cdot \left(\frac{M}{L^3}\right)^d = M^0 \cdot L^0 \cdot t^0 \cdot T^0$$

Igualando as potências de mesma base, tem-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} a - c = 0 \\ b + c - 3d = 0 \\ c + d = 0 \\ -3c = 0 \end{cases}$$

Resolvendo o sistema, tem-se que:

$$a = b = c = d = 0$$

Como nenhum dos expoentes foi diferente de zero, pode-se afirmar que não é possível formar um grupo adimensional, exclusivamente com as variáveis selecionadas como desejado.

Passo 4: Agregar uma das variáveis restantes de modo a formar um produto de potências, em seguida resolver algebricamente os expoentes que tornam o produto de potências adimensional. Repetir o processo até que todas as variáveis restantes formem  $(n-j=k)$  produtos Pi;

Como indicado anteriormente, estão envolvidas nove variáveis, das quais quatro foram selecionadas como variáveis repetitivas. Deste modo, sobram cinco variáveis, as quais combinadas com as variáveis repetitivas, uma a uma, formam cinco grupos Pi adimensionais, que são determinadas da seguinte forma:

$$\Pi_1 = t \cdot T_f^a \cdot L_{c,p}^b \cdot k^c \cdot \rho^d = 1$$

No sistema de dimensões MLtT:

$$t \cdot T^a \cdot L^b \cdot \left(\frac{ML}{t^3T}\right)^c \cdot \left(\frac{M}{L^3}\right)^d = M^0 \cdot L^0 \cdot t^0 \cdot T^0$$

Igualando as potências de mesma base, tem-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} c + d = 0 \\ b + c - 3d = 0 \\ a - c = 0 \\ 1 - 3c = 0 \end{cases}$$

Resolvendo o sistema, tem-se que:

$$a = c = \frac{1}{3}; \quad b = -\frac{4}{3}; \quad d = -\frac{1}{3}$$

Então tem-se que:

$$\Pi_1 = t \cdot T_f^{1/3} \cdot L_{c,p}^{(-4/3)} \cdot k^{1/3} \cdot \rho^{(-1/3)}$$

$$\Pi_1 = t \cdot \left( \frac{T_f \cdot k}{L_{c,p}^4 \rho} \right)^{1/3}$$

**Eq. (3.2)**

Resolvendo analogamente para as demais variáveis:

$$\Pi_2 = \frac{T_0}{T_f}$$

**Eq. (3.3)**

$$\Pi_3 = \frac{L_{c,f}}{L_{c,p}}$$

**Eq. (3.4)**

$$\Pi_4 = c_p \cdot \left( \frac{T_f \cdot L_{c,p}^2 \rho^2}{k^2} \right)^{1/3}$$

**Eq. (3.5)**

$$\Pi_5 = \frac{h \cdot L_{c,p}}{k} = Bi^3$$

**Eq. (3.6)**

---

<sup>3</sup> Número de Biot

Passo 5: Escrever a função adimensional final, de modo a facilitar o isolamento das variáveis de interesse. Conforme a Eq. (3.7).

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \dots, \Pi_n)$$

**Eq. (3.7)**

Assim:

$$t \cdot \left( \frac{T_f \cdot k}{L_{c,p}^4 \rho} \right)^{1/3} = f \left( \frac{T_0}{T_f}, \frac{L_{c,f}}{L_{c,p}}, c_p \cdot \left( \frac{T_f \cdot L_{c,p}^2 \rho^2}{k^2} \right)^{1/3}, \frac{h \cdot L_{c,p}}{k} \right)$$

**Eq. (3.8)**

A aplicação do Teorema dos Pi de Buckingham fornece a equação 3.8, que após o tratamento estatístico realizado no apêndice B e a obtenção das propriedades do material de cada ensaio apresentado na tabela C.1 do apêndice C, origina uma tabela, na qual são apresentados os valores de cada um dos grupos Pi, para cada experimento.

### 3.2.3 Fase de Análise de Dados

Nesta fase os tempos coletados com os experimentos, apresentados no apêndice A, foram organizados. Inicialmente foi determinado o intervalo de confiança para a média aritmética dos tempos, visto que foram realizadas quatro repetições de cada ensaio, para isso, pelo fato da amostra ser pequena, utilizou-se a distribuição “t de Student”.

Depois de calculada a média aritmética, o desvio padrão e o intervalo de confiança são apresentados os dados na tabela B.1 do apêndice B.

Em seguida foram realizadas análises de variância entre cada grupo, envolvido nos experimentos, de modo a verificar se as médias obtidas apresentam diferença significativa, ou podem apenas ser atribuídas ao acaso. Os resultados destas análises de variância são apresentados nas tabelas B.2 a B.9 do apêndice B e discutidos no próximo capítulo.

### 3.2.4 Fase de Desenvolvimento e Comparação da Equação

Finalmente com os dados da tabela onde são apresentados os valores de cada um dos grupos Pi, é possível realizar uma regressão multivariada, de modo a encontrar uma equação que os correlacione. Consequentemente é possível

encontrar a equação que relaciona o tempo de homogeneização com as demais variáveis do processo.

A equação 2.7 apresenta uma equação desenvolvida analiticamente para a obtenção do tempo de homogeneização da temperatura, entretanto esta equação não é possível de ser resolvida algebricamente, necessitando da aplicação de métodos computacionais para a obtenção do seu resultado, pois, o limite superior da integral apresentado nesta equação é igual aos valores da temperatura do fluido na corrente livre ( $T_{\infty}$ ) e das vizinhanças radiantes ( $T_{viz}$ ), que são iguais entre si, gerando uma indeterminação neste ponto.

A solução da equação 2.7 é então realizada utilizando-se integração numérica computacional através do algoritmo “1/3 de Simpson”<sup>4</sup>.

Em seguida com os resultados da integração numérica computacional, os resultados da equação objeto deste projeto e a estimativa apresentada no catálogo da Villares (meia hora por polegada da seção da geometria), é realizada uma análise comparativa dos resultados.

---

<sup>4</sup> Vide RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R., Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais, página 302.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

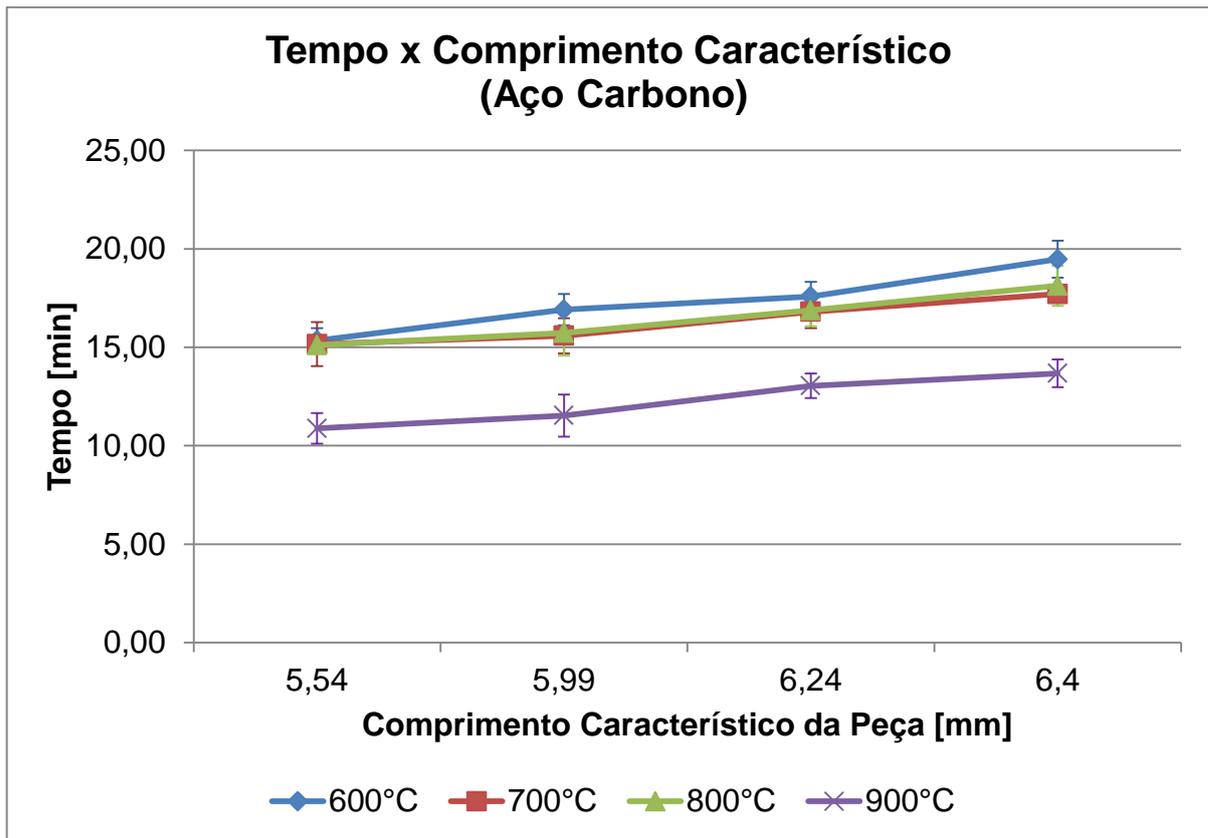
Para a obtenção do resultado final deste projeto, uma equação que seja capaz de descrever o fenômeno de homogeneização da temperatura em peças no interior de fornos de tratamentos térmicos, foi necessária uma análise aprofundada de cada particularidade deste fenômeno. Esta análise fornece resultados intermediários que são discutidos neste capítulo juntamente com o resultado final, a equação.

### **4.1 Influência das Variáveis do Processo no Tempo de Homogeneização**

Os parâmetros variados nos experimentos realizados neste trabalho foram o comprimento característico, a temperatura e o material das amostras (propriedades térmicas), assim é possível mensurar a influência de cada um destes parâmetros no tempo de homogeneização da temperatura.

#### **4.1.1 Influência do Comprimento Característico no Tempo de Homogeneização**

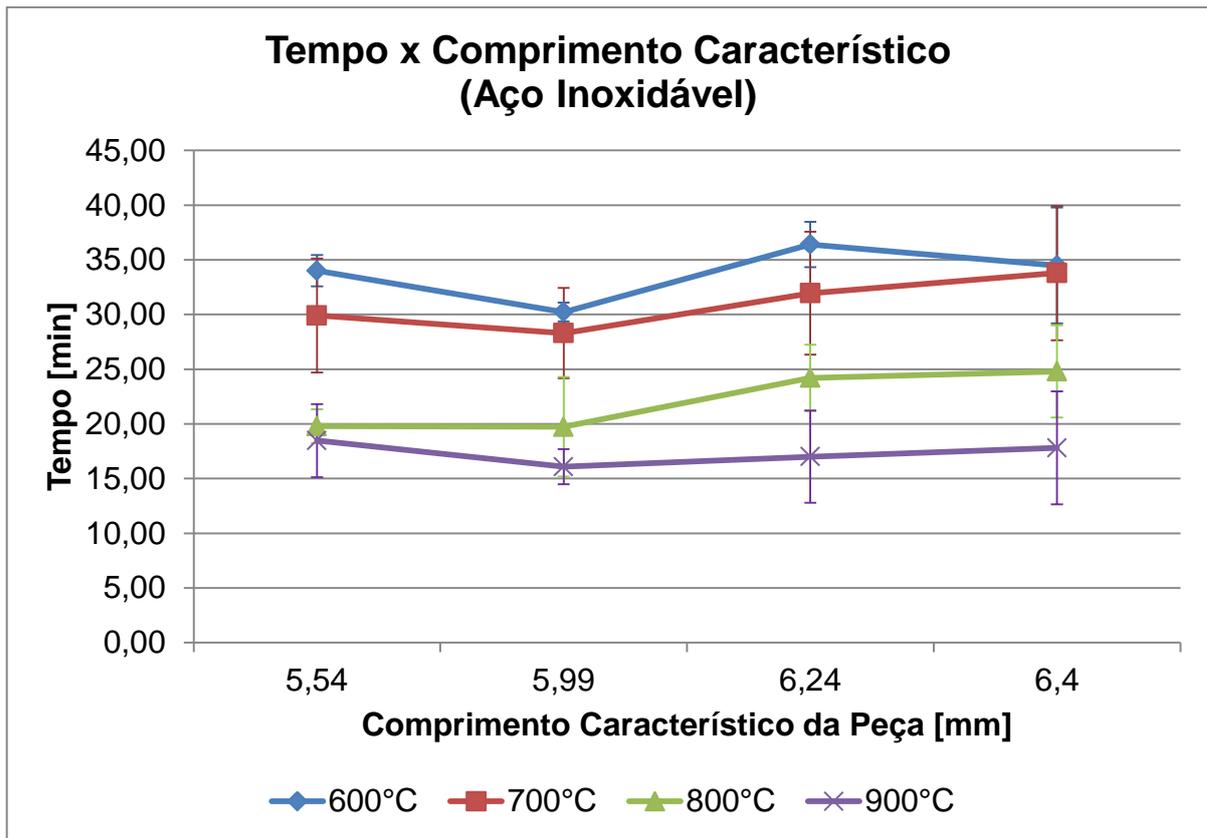
Com base nos dados apresentados na tabela B.1, é possível a elaboração dos gráficos 4.1 e 4.2. Sendo o gráfico 4.1 referente à influência do comprimento característico da peça sobre o tempo para os ensaios realizados com as amostras de aço carbono AISI 1045, e o gráfico 4.2 referente aos ensaios com as amostras de aço inoxidável AISI 304.



**Gráfico 4.1 - Relação entre o tempo de homogeneização e o comprimento característico para as amostras de aço carbono AISI 1045**

A partir do gráfico 4.1 e das tabelas B.6 à B.9 é possível constatar que quanto maior o comprimento característico da peça, maior é o tempo necessário para que ocorra a homogeneização da temperatura.

Esta variação do tempo com o comprimento característico pode ser justificada pelas características do processo de transferência de calor envolvido, visto que para aumentar o comprimento característico deve-se aumentar o volume do corpo ou reduzir a área superficial ou ambas, assim quando ocorre um aumento no volume do corpo para uma massa específica constante, a massa do corpo será acrescida, demandando uma quantidade maior de energia para elevar sua temperatura. Analogamente quando se reduz a área superficial de um corpo, proporcionalmente reduz-se a sua capacidade de receber calor, seja por radiação ou convecção. Deste modo, quando a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura do corpo, ou a capacidade de transferência de calor são alteradas necessariamente o tempo de homogeneização da temperatura também o será, como mostrado no gráfico 4.1.



**Gráfico 4.2 - Relação entre o tempo de homogeneização e o comprimento característico para as amostras de aço inoxidável AISI 304**

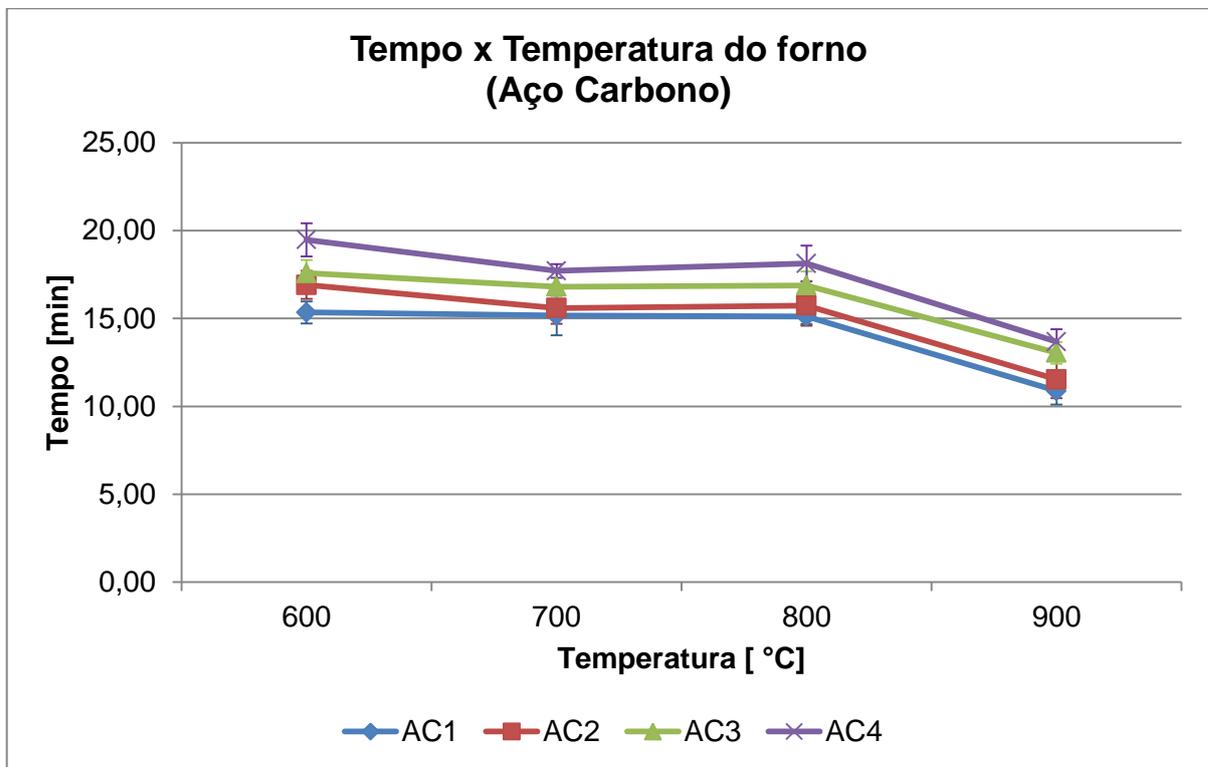
Do gráfico 4.2 não é possível identificar variação considerável estatisticamente para o tempo de homogeneização quando relacionado com o comprimento característico da peça, ou seja, não é notado um comportamento de aumento ou decréscimo que possa ser estatisticamente comprovado, através da análise de variância (ANOVA) apresentada nas tabelas de B.14 à B.17. Apesar de a ANOVA apresentar resultado indicando que as médias não são todas iguais, a análise comparativa de Tukey-Kramer mostra que as médias não são todas estatisticamente diferentes, ou seja algumas são iguais entre si.

Além disso, é possível que, para este material, a variação no comprimento característico entre as amostras não tenha sido grande o suficiente para que o aumento no tempo fosse observado. Experimentos com variações maiores deste parâmetro poderiam confirmar esta hipótese.

#### 4.1.2 Influência da Temperatura do Forno no Tempo de Homogeneização

Com os dados da tabela B.1, os gráficos 4.3 e 4.4 são elaborados e representam a influência da temperatura sobre o tempo homogeneização, tanto nas

amostras de aço carbono, gráfico 4.3, como para as amostras de aço inoxidável, gráfico 4.4.

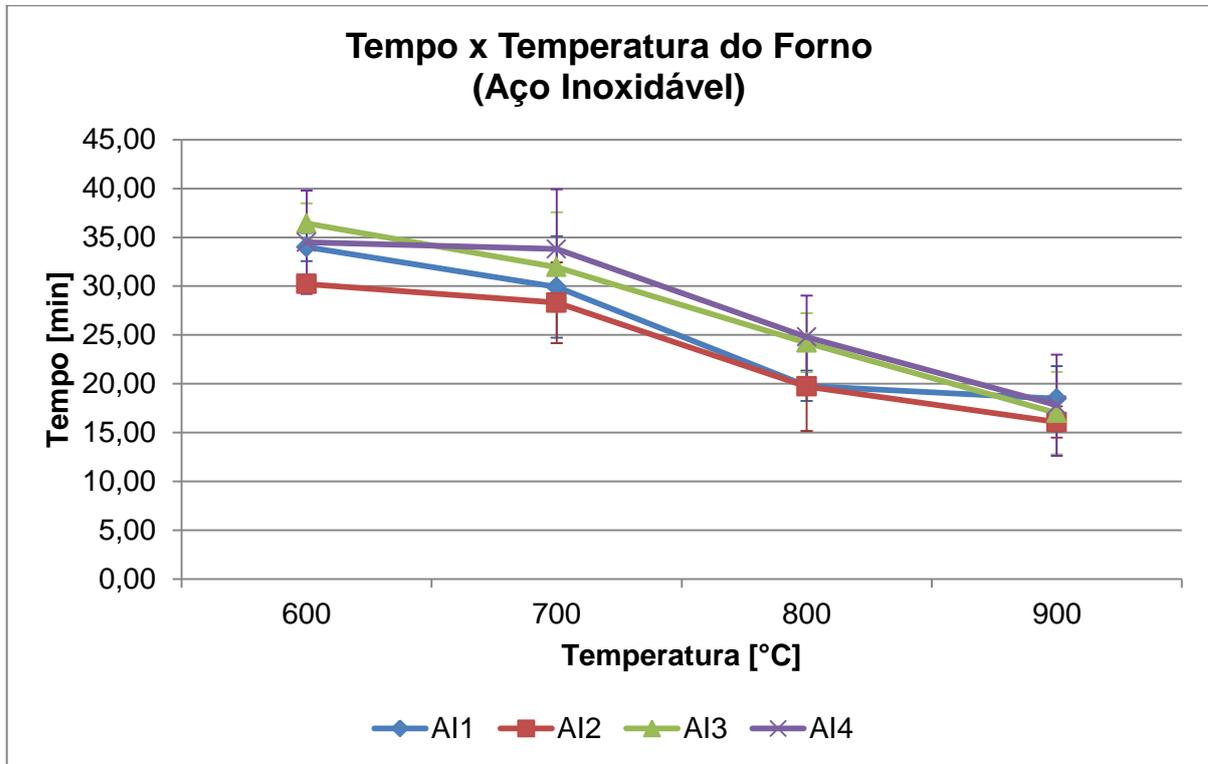


**Gráfico 4.3 - Relação entre o tempo de homogeneização e a temperatura para as amostras de aço carbono AISI 1045**

Analogamente à análise realizada para a influência do comprimento característico no tempo de homogeneização nas amostras de aço inoxidável, a ANOVA, tabelas B.2 a B.5, indicou que as médias não são todas iguais, no entanto a análise de Tukey-Kramer, indica que estas também não são todas diferentes. Este fato fica evidenciado para a faixa de temperatura de 700°C a 800°C, na qual se considerado o intervalo de confiança as médias para cada amostra são estatisticamente iguais.

Entretanto, se cada amostra for analisada individualmente nota-se que ocorre um decréscimo do tempo com o aumento da temperatura. Isto pode ser relacionado ao fato de que com um maior gradiente de temperatura entre a temperatura do forno e a temperatura inicial da peça, a taxa de transferência de calor também aumenta, fazendo com que o tempo seja reduzido.

Este decréscimo do tempo com o aumento da temperatura também pode ser verificado nas amostras de aço inoxidável, como apresentado no gráfico 4.4.



**Gráfico 4.4 - Relação entre o tempo de homogeneização e a temperatura para as amostras de aço inoxidável AISI 304**

Analisando-se as curvas mostradas nos gráficos 4.3 e 4.4, pode-se notar que a queda no tempo para a homogeneização é maior para o aço inoxidável do que para o aço carbono, ou seja, a inclinação da curva do aço inoxidável é maior. A diferença média no tempo de aquecimento até 600°C e 900°C para o aço carbono é de aproximadamente 29% (média para todos os comprimentos característicos), enquanto que para o aço inoxidável esta queda é de aproximadamente 45%.

A diminuição do tempo necessário para atingir o equilíbrio térmico para temperaturas mais altas, embora possa parecer contra intuitiva, uma vez que é preciso fornecer mais energia para as amostras a fim de aquecê-las a temperaturas mais elevadas, pode ser explicada através das equações 2.1 e 2.2 (páginas 21 e 22 respectivamente). Ambas mostram que a taxa de transferência de calor, seja por convecção ou radiação, é proporcional à resistividade térmica do modo de transferência de calor (para a convecção é o produto entre o coeficiente convectivo e a área superficial da peça, e para a radiação o produto entre a constante de Stefan-

Boltzmann, a emissividade e a área superficial da peça) e à diferença de temperatura entre a corrente fluída (atmosfera do forno) e paredes do forno e a superfície do corpo. Sendo assim, para casos nos quais a resistividade térmica se mantém constante, é de se esperar que o tempo para atingir o equilíbrio térmico seja menor quanto maior for a temperatura do forno.

#### 4.1.3 Influência do Material da Amostra no Tempo de Homogeneização

As análises apresentadas anteriormente apresentam individualmente os efeitos do material da amostra, neste item é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos para os ensaios realizados para cada material para cada situação específica, de modo que as temperaturas e comprimentos característicos são similares para cada um dos materiais.

Nos gráficos 4.5 a 4.8 são apresentadas comparações entre os materiais, quanto à variação do comprimento característico para cada temperatura.

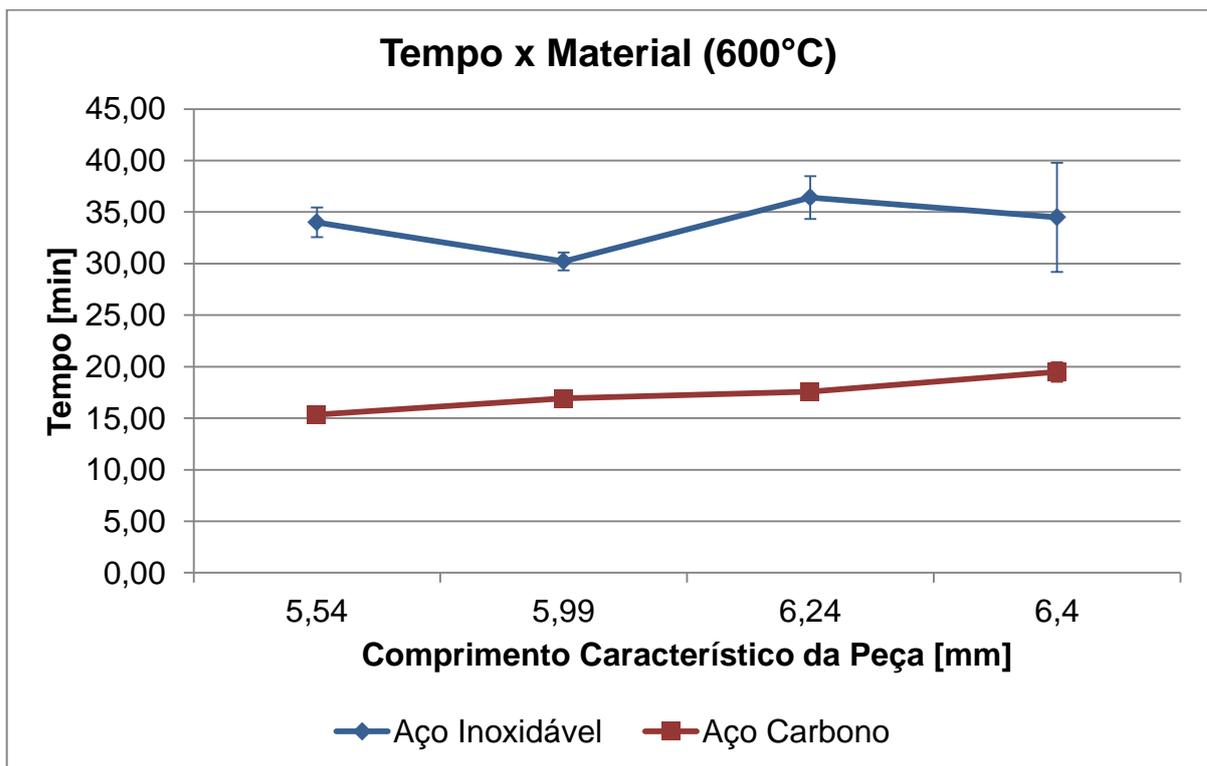


Gráfico 4.5 - Comparação entre os tempos para os diferentes materiais a 600°C variando o comprimento característico da amostra.

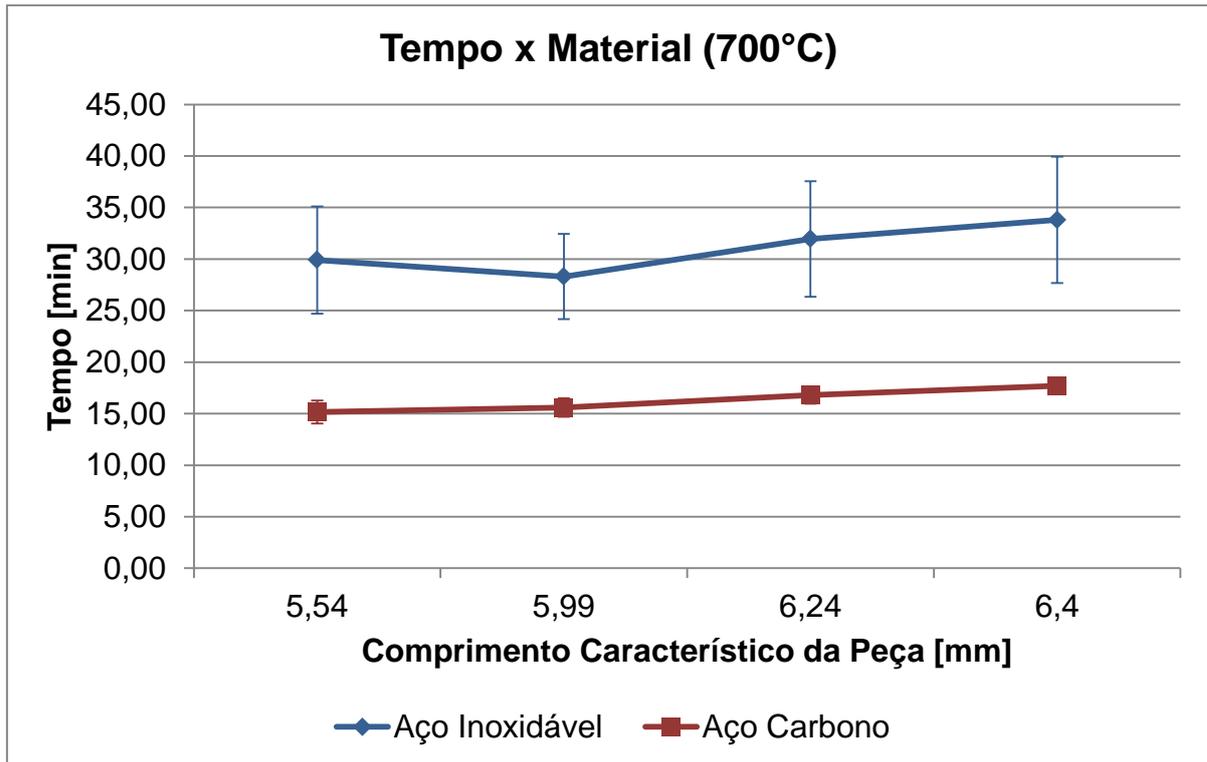


Gráfico 4.6 - Comparação entre os tempos para os diferentes materiais a 700°C variando o comprimento característico da amostra.

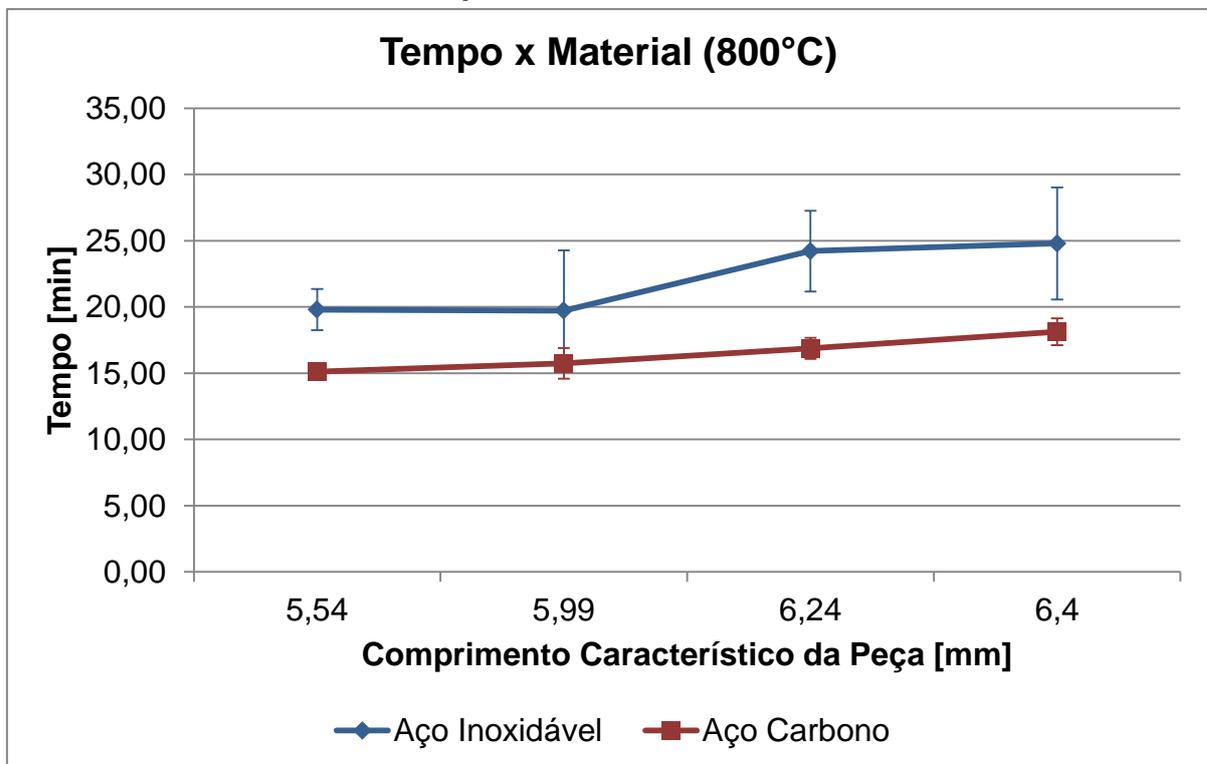
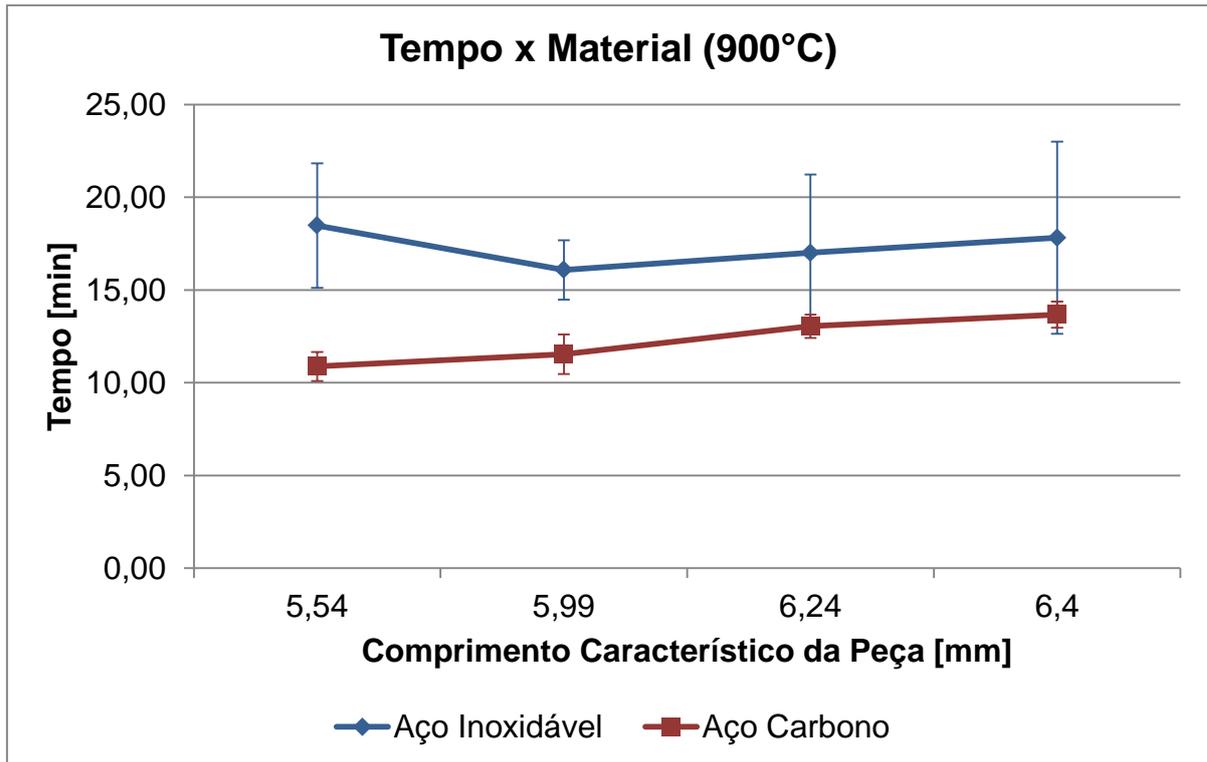


Gráfico 4.7 - Comparação entre os tempos para os diferentes materiais a 800°C variando o comprimento característico da amostra.



**Gráfico 4.8 - Comparação entre os tempos para os diferentes materiais a 900°C variando o comprimento característico da amostra.**

Analisando os gráficos é possível notar que para a faixa de temperatura ensaiada, o tempo de homogeneização da temperatura nas amostras de aço inoxidável é maior do que nas amostras de aço carbono, isto é justificado pela diferença nos valores das propriedades térmicas dos materiais.

Como pode ser verificado nos gráficos C.1 e C.2 do apêndice C, a capacidade de absorver calor dos materiais é semelhante, para a faixa de temperatura dos experimentos, pois, os valores do calor específico são próximos, no entanto a grande diferença nos valores da condutividade térmica, mais elevada para o aço carbono, justifica o menor tempo na homogeneização da temperatura, visto que no interior das amostras o calor é transferido com maior eficiência.

#### **4.2 Desenvolvimento da Equação do Tempo de Homogeneização da Temperatura**

Para o desenvolvimento da equação que relaciona o tempo de homogeneização com as demais variáveis do processo, neste trabalho, é proposto que sejam reduzidas estas variáveis, através da aplicação do Teorema dos Pi de

Buckingham, a números adimensionais nomeados de Pi's que correlacionam as variáveis de acordo com as equações 3.2 a 3.6.

Nas equações 3.2 a 3.5, as variáveis envolvidas são obtidas com os valores das propriedades dos materiais apresentada no apêndice C e os demais parâmetros variáveis dos experimentos, tabela 4.1.

Entretanto, na equação 3.6 faz-se necessário a determinação do coeficiente convectivo. A obtenção desta variável está apresentada no apêndice D. Visto que o coeficiente convectivo é uma função da geometria do corpo e das temperaturas envolvidas, e que estes parâmetros são variados em cada um dos experimentos realizados, cada experimento deve apresentar um coeficiente convectivo. Porém, como a determinação do coeficiente convectivo carece de um estudo aprofundado do processo de transferência de calor, e este não é o objetivo deste trabalho, a obtenção demonstrada no apêndice D apresenta o coeficiente para um único experimento, que será generalizado para todos os demais.

Na tabela 4.1 são apresentados os valores das variáveis para os 32 experimentos realizados, a partir destes valores são calculados os valores dos grupos Pi, apresentados na tabela 4.2.

**Tabela 4.1 - Valores das Variáveis para Cada Experimento**

Exp.	Tempo [s]	Temperatura		Comp. Característico		Propriedades dos Materiais			Coef. Convectivo [W/m²K]
		Inicial [K]	Final [K]	Peça [m]	Forno [m]	Calor Específico [J/KgK]	Cond. Térmica [W/mK]	Massa Específica [kg/m³]	
1	921	293	873	5,54E-3	0,03	592,62	48,50	7854	186
2	910		973			632,42	46,32		
3	907		1073			674,89	44,13		
4	653		1173			720,21	41,95		
5	1015		873	592,62		48,50			
6	935		973	632,42		46,32			
7	944		1073	674,89		44,13			
8	692		1173	720,21		41,95			
9	1055		873	592,62		48,50			
10	1008		973	632,42		46,32			
11	1013		1073	674,89		44,13			
12	783		1173	720,21		41,95			
13	1169		873	592,62		48,50			
14	1063		973	632,42		46,32			
15	1088		1073	674,89		44,13			
16	821		1173	720,21		41,95			
17	2040		873	547,24		20,11	7900		
18	1795		973	558,88		20,87			
19	1188		1073	569,63		21,59			
20	1108		1173	579,62		22,29			
21	1813		873	547,24		20,11			
22	1698		973	558,88		20,87			
23	1184		1073	569,63		21,59			
24	965		1173	579,62		22,29			
25	2185		873	547,24		20,11	7900		
26	1917		973	558,88		20,87			
27	1453		1073	569,63		21,59			
28	1020		1173	579,62		22,29			
29	2069		873	547,24		20,11			
30	2028		973	558,88		20,87			
31	1488		1073	569,63		21,59			
32	1069		1173	579,62		22,29			

Tabela 4.2 - Valores dos Grupos Pi

Exp.	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_4$	$\Pi_5$
1	1647465	0,3356	5,4152	5268	0,0212
2	1661246	0,3011	5,4152	6011	0,0222
3	1683319	0,2731	5,4152	6844	0,0233
4	1227571	0,2498	5,4152	7783	0,0246
5	1635418	0,3356	5,0083	5550	0,0230
6	1539424	0,3011	5,0083	6332	0,0241
7	1580097	0,2731	5,0083	7210	0,0252
8	1172689	0,2498	5,0083	8199	0,0266
9	1610004	0,3356	4,8077	5703	0,0239
10	1570885	0,3011	4,8077	6507	0,0251
11	1604629	0,2731	4,8077	7409	0,0263
12	1256096	0,2498	4,8077	8425	0,0277
13	1724791	0,3356	4,6875	5800	0,0245
14	1601006	0,3011	4,6875	6618	0,0257
15	1666247	0,2731	4,6875	7535	0,0270
16	1272969	0,2498	4,6875	8569	0,0284
17	2715843	0,3356	5,4152	8783	0,0512
18	2507630	0,3011	5,4152	9073	0,0494
19	1734025	0,2731	5,4152	9340	0,0477
20	1684803	0,2498	5,4152	9585	0,0462
21	2175012	0,3356	5,0083	9252	0,0554
22	2138134	0,3011	5,0083	9558	0,0534
23	1557282	0,2731	5,0083	9839	0,0516
24	1321610	0,2498	5,0083	10097	0,0500
25	2481856	0,3356	4,8077	9508	0,0577
26	2285524	0,3011	4,8077	9822	0,0556
27	1809831	0,2731	4,8077	10111	0,0537
28	1323482	0,2498	4,8077	10377	0,0521
29	2272787	0,3356	4,6875	9670	0,0592
30	2337621	0,3011	4,6875	9990	0,0570
31	1792220	0,2731	4,6875	10283	0,0551
32	1340064	0,2498	4,6875	10553	0,0534

Com os valores apresentados na tabela 4.2, é realizada uma regressão múltipla para a obtenção da equação que relaciona o  $\Pi_1$  com os demais. Para a construção da melhor relação entre os grupos Pi, foi aplicado o “Método dos Melhores Subconjuntos”<sup>5</sup>, e os cálculos referentes a esta aplicação que são

---

<sup>5</sup> Vide LEVINE, D. M *et al.*, Estatística: Teoria e Aplicações, página 302.

realizados utilizando o programa *Microsoft Excel*® estão apresentados no apêndice E.

A aplicação do “Método dos Melhores Subconjuntos” apresenta a equação 4.1.

$$\Pi_1 = 11,395 \cdot 10^6 \cdot \Pi_2 + 0,319 \cdot 10^6 \cdot \Pi_3 + 159,92 \cdot \Pi_4 - 4,474 \cdot 10^6$$

**Eq. (4.1)**

Substituindo os grupos Pi por suas respectivas equações, as quais relacionam os mesmos com as variáveis do processo, tem-se:

$$t \cdot \left( \frac{T_f \cdot k}{L_{c,p}^4 \cdot \rho} \right)^{1/3} = 11,395 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{T_0}{T_f} \right) + 0,319 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{L_{c,f}}{L_{c,p}} \right) + 159,92 \cdot \left[ c_p \cdot \left( \frac{T_f \cdot L_{c,p}^2 \cdot \rho^2}{k^2} \right)^{1/3} \right] - 4,474 \cdot 10^6$$

**Eq. (4.2)**

Isolando o tempo:

$$t = \left( \frac{L_{c,p}^4 \cdot \rho}{T_f \cdot k} \right)^{1/3} \cdot \left\{ 11,395 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{T_0}{T_f} \right) + 0,319 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{L_{c,f}}{L_{c,p}} \right) + 159,92 \cdot \left[ c_p \cdot \left( \frac{T_f \cdot L_{c,p}^2 \cdot \rho^2}{k^2} \right)^{1/3} \right] - 4,474 \cdot 10^6 \right\}$$

**Eq. (4.3)**

A equação 4.2, resultado da aplicação do “Método dos Melhores Subconjuntos”, apresenta coeficiente de determinação ajustado de 0,7605<sup>6</sup>, o que significa de acordo com Levine *et al.* (2012, p.542) que 76,05% da variação do tempo de homogeneização pode ser explicada pelo modelo de regressão múltipla obtido, ajustado em função do número de variáveis independentes e da quantidade de experimentos realizados.

Outra informação importante proveniente da aplicação do “Método dos Melhores Subconjuntos” é quanto à abrangência dos resultados obtidos com a equação 4.2, que é determinado analisando-se o valor do fator inflacionário da variância (FIV). Esta análise é realizada verificando quão próximo do valor 1 o FIV é, para o modelo encontrado, sendo que quanto mais próximo de 1 o FIV, para cada uma das variáveis independentes, mais abrangente é o resultado.

---

<sup>6</sup> Obtido através do programa *Microsoft Excel*®

Segundo Levine *et al.* (2012, p.592), é necessária extrema cautela quando se trabalha com valores de FIV elevados, visto que neste caso as previsões realizadas com o modelo de regressão, são válidas somente quando os valores das variáveis independentes estiverem dentro do intervalo experimentado.

Os valores<sup>7</sup> do FIV para as variáveis independentes  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$  e  $\Pi_4$  da equação 4.1, são respectivamente 1,1923, 1,0407 e 1,2330, que são valores muito bons, significando que o modelo de regressão múltipla apresentado pode prever o comportamento da variável dependente além do intervalo dos valores das variáveis independentes do experimento.

Além disso, as variáveis independentes da equação 4.1 são os grupos  $P_i$ , que por serem combinações dos parâmetros do processo podem apresentar valores constantes para uma grande variação desses parâmetros, ampliando ainda mais a abrangência do modelo.

A equação 4.3 apresentada é o produto deste trabalho, pois, relaciona as variáveis do processo com o tempo necessário para a homogeneização da temperatura das peças no interior de fornos de tratamento térmico. A tabela 4.3 apresenta o valor do tempo medido nos experimentos (real), valor do tempo obtido pelo modelo (previsto) e o erro.

Nesta tabela é possível verificar que o valor máximo do erro apresentado pelo modelo em relação ao valor efetivamente medido nos experimentos é de 24%, este erro foi obtido no experimento 15, e equivale a 3,5 minutos. Apesar deste valor de 24%, para o erro, ser relativamente alto isto não impede a utilização do modelo visto que a média do erro foi de 0,04% com desvio padrão de 11%.

---

<sup>7</sup> Obtidos através do programa *Microsoft Excel*®

**Tabela 4.3 – Comparação Entre o Tempo Medido e o Tempo Previsto Pelo Modelo, e Erro**

Exp.	Tempo medido [min]	Tempo previsto pelo modelo [min]	Erro [%]	Exp.	Tempo medido [min]	Tempo previsto pelo modelo [min]	Erro [%]
1	15,4	17,9	14%	17	34,0	31,1	-9%
2	15,2	15,1	-1%	18	29,9	25,5	-17%
3	15,1	13,1	-15%	19	19,8	21,3	7%
4	10,9	12,0	9%	20	18,5	18,0	-3%
5	16,9	19,0	11%	21	30,2	33,8	11%
6	15,6	15,9	2%	22	28,3	27,6	-2%
7	15,7	13,9	-13%	23	19,7	23,0	14%
8	11,5	12,6	9%	24	16,1	19,3	17%
9	17,6	19,7	11%	25	36,4	35,3	-3%
10	16,8	16,4	-2%	26	31,9	28,9	-11%
11	16,9	14,3	-18%	27	24,2	24,0	-1%
12	13,0	13,1	0%	28	17,0	20,2	16%
13	19,5	20,1	3%	29	34,5	36,4	5%
14	17,7	16,8	-6%	30	33,8	29,7	-14%
15	18,1	14,6	-24%	31	24,8	24,7	-1%
16	13,7	13,3	-2%	32	17,8	20,7	14%

Para o fim que se deseja aplicar a equação desenvolvida bem como seus resultados, a obtenção de valores para o tempo menores do que o necessário podem não fornecer as condições necessárias para a homogeneização da temperatura, conseqüentemente os resultados metalúrgicos podem não ser os necessários. Deste modo, definiu-se que seja admitido um coeficiente de segurança capaz de corrigir eventuais tempos menores do que o necessário, sendo 24% a maior diferença a menor, para esta equação desenvolvida o coeficiente de segurança é de 1,25, ou seja, o tempo obtido pelo modelo deve ser multiplicado por este valor para assegurar o atingimento da completa homogeneização da temperatura.

### 4.3 Solução do Método da Capacitância Global

Conforme apresentado anteriormente a validade do resultado obtido através do Método da Capacitância Global, está condicionada ao fato de que o valor do número de Biot deve ser muito menor do que um. Ressaltando que o grupo  $\Pi_5$  é o

próprio número de Biot e que seus valores para todos os experimentos realizados estão apresentados na tabela 4.2, e são muito menores do que um, é possível afirmar que as soluções do MCG são adequadas para os casos em questão.

A equação 2.7, reapresentada, é a solução do Método da Capacitância Global (MCG) para o problema do aquecimento de peças no interior de fornos. A resolução algébrica da equação é realizada através da aplicação do método de integração numérica “1/3 de Simpson” na qual foram utilizados 10.000 intervalos, para tanto é utilizado o programa *MathWorks Matlab®*, e os valores para cada um dos casos experimentados são apresentados na tabela 4.4 juntamente com os valores de tempo medido e o erro.

$$t = \int_{T_0}^{T_1} \frac{\rho L_c c_p}{h(T_\infty - T) + \varepsilon \sigma (T_{viz}^4 - T^4)} dT$$

Eq. (2.7)

**Tabela 4.4 - Comparação Entre o Tempo Medido e o Tempo Calculado Pelo MCG, e Erro**

Exp.	Tempo medido [min]	Tempo calculado pelo MCG [min]	Erro [%]	Exp.	Tempo medido [min]	Tempo calculado pelo MCG [min]	Erro [%]
1	15,4	15,7	2%	17	34,0	20,3	-68%
2	15,2	14,9	-2%	18	29,9	30,3	1%
3	15,1	15,6	3%	19	19,8	20,3	3%
4	10,9	10,7	-2%	20	18,5	18,8	2%
5	16,9	16,8	-1%	21	30,2	30,7	1%
6	15,6	15,2	-3%	22	28,3	28,4	0%
7	15,7	15,4	-2%	23	19,7	16,9	-16%
8	11,5	11,6	1%	24	16,1	16,8	5%
9	17,6	17,0	-3%	25	36,4	29,4	-24%
10	16,8	16,0	-5%	26	31,9	18,7	-71%
11	16,9	16,1	-5%	27	24,2	23,9	-1%
12	13,0	12,9	-1%	28	17,0	14,7	-16%
13	19,5	20,3	4%	29	34,5	32,9	-5%
14	17,7	17,4	-2%	30	33,8	16,6	-103%
15	18,1	17,7	-3%	31	24,8	25,4	2%
16	13,7	13,7	0%	32	17,8	18,1	2%

Na tabela 4.4 é possível verificar que o maior valor do erro apresentado pela solução do MCG em relação ao valor efetivamente medido nos experimentos é de -103%, este erro foi obtido no experimento 30, e equivale a 17,2 minutos. Este resultado tão divergente em relação ao experimentado é justificado pelo fato de que a solução do MCG necessita da convergência da função quando a mesma é inserida no programa<sup>8</sup> e para alguns casos isolados, como pode ser notado na tabela 4.4, isto não é possível. Entretanto a média do erro para esta solução é de -10% com desvio padrão de 24%. Com isso nota-se que esta solução apresenta uma boa aproximação.

#### **4.4 Comparação Entre o Modelo Desenvolvido e a Solução do Método da Capacitância Global**

Os gráficos 4.9 a 4.16 apresentam comparativos entre os resultados do modelo desenvolvido e as soluções do Método da Capacitância Global. Além disso, nestes mesmos gráficos também foram incluídas as estimativas previstas pelo catálogo da empresa Villares Metals (meia hora por polegada da seção da geometria).

Cada gráfico apresenta a variação do tempo com a temperatura para cada comprimento característico e material.

---

<sup>8</sup> Programa *MathWorks Matlab*®

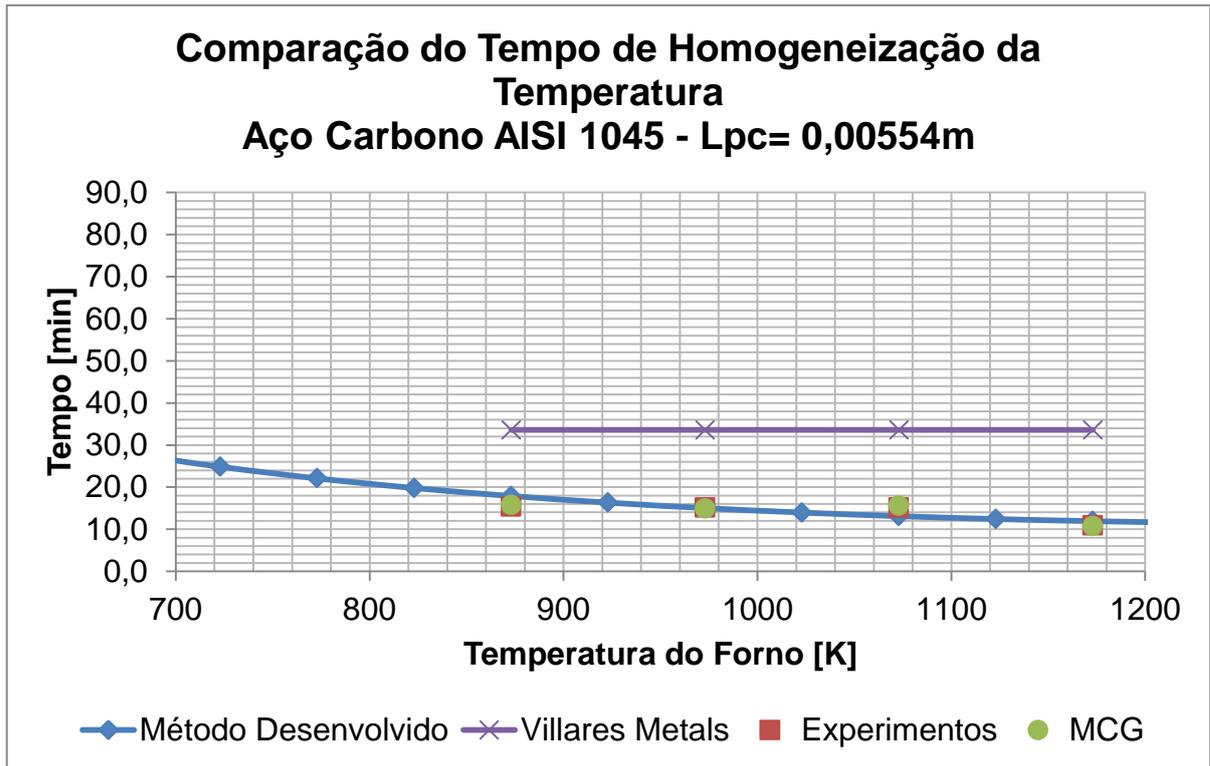


Gráfico 4.9 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Carbono com  $L_{pc}=0,00554m$ .

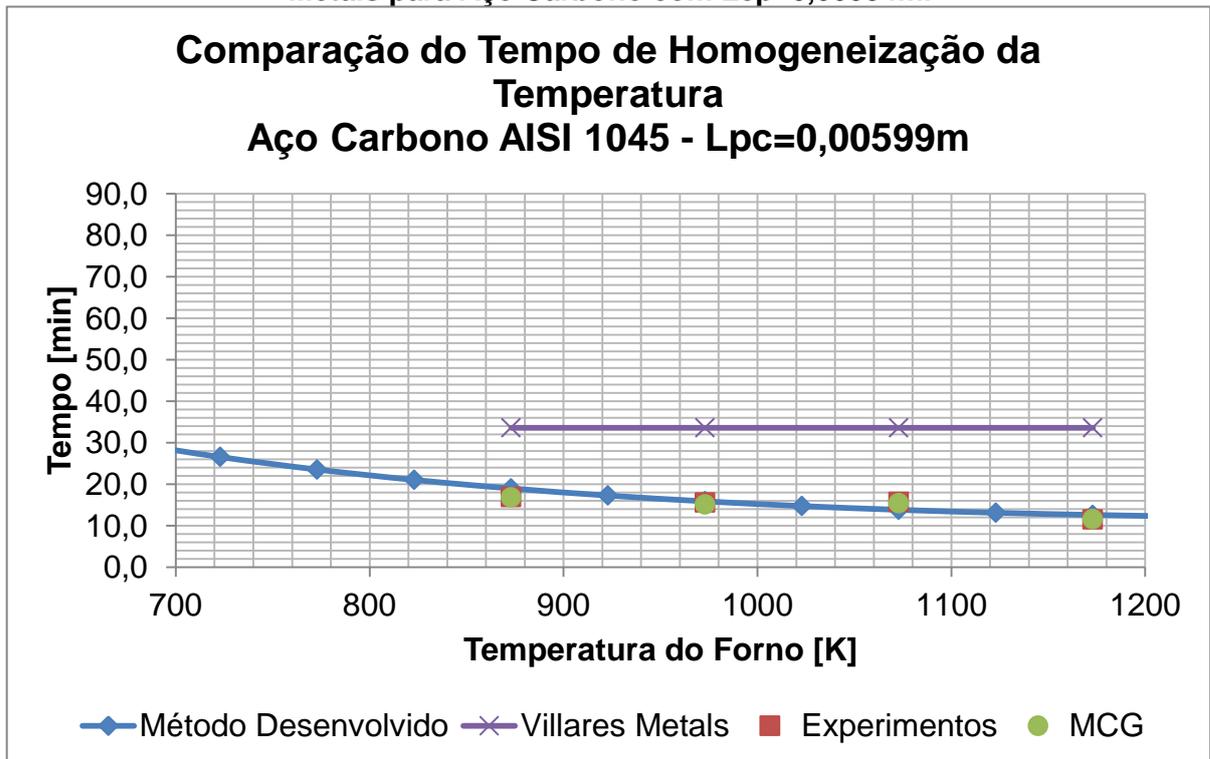


Gráfico 4.10 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Carbono com  $L_{pc}=0,00599m$ .

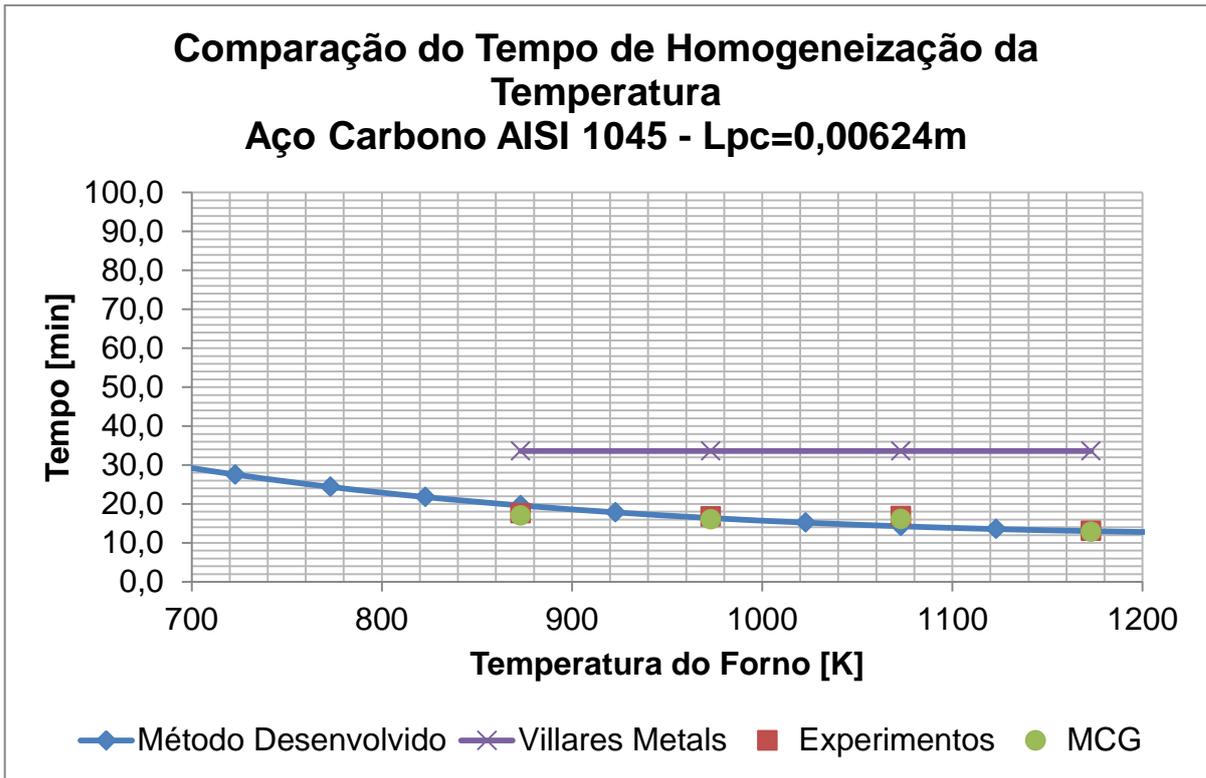


Gráfico 4.11 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Carbono com  $L_{pc}=0,00624m$ .

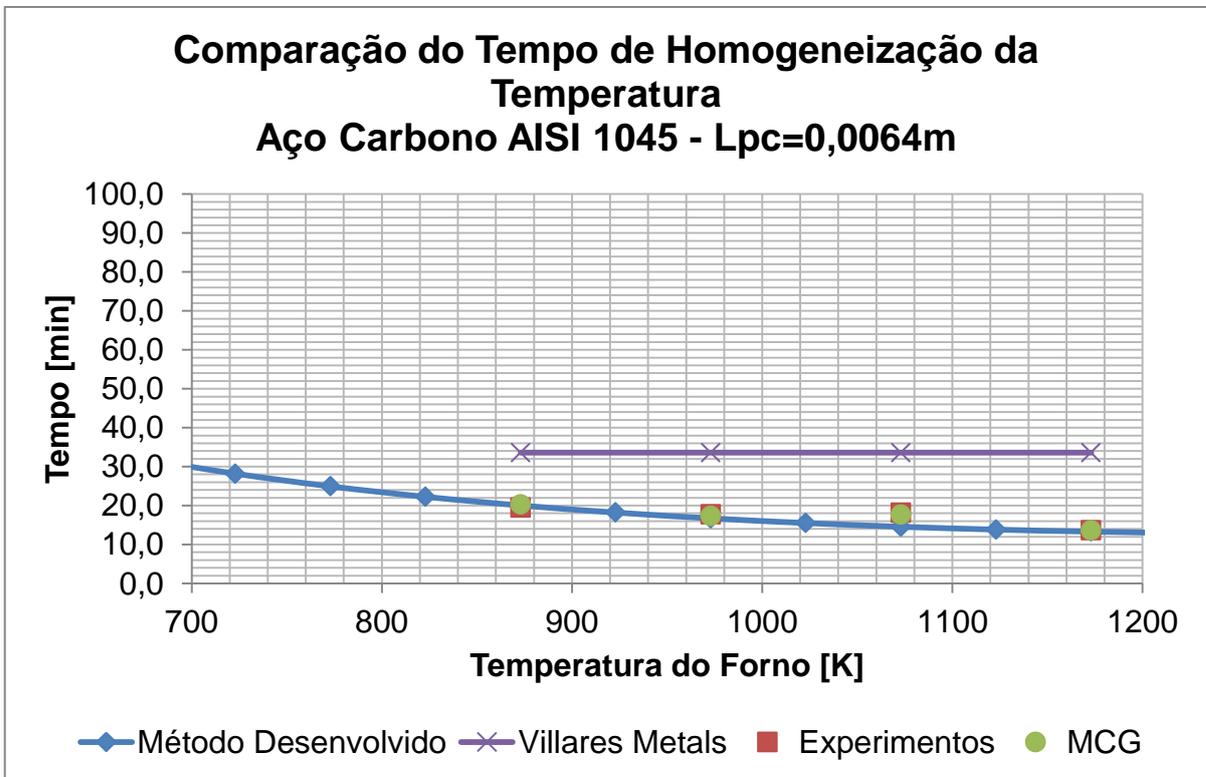


Gráfico 4.12 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Carbono com  $L_{pc}=0,0064m$ .

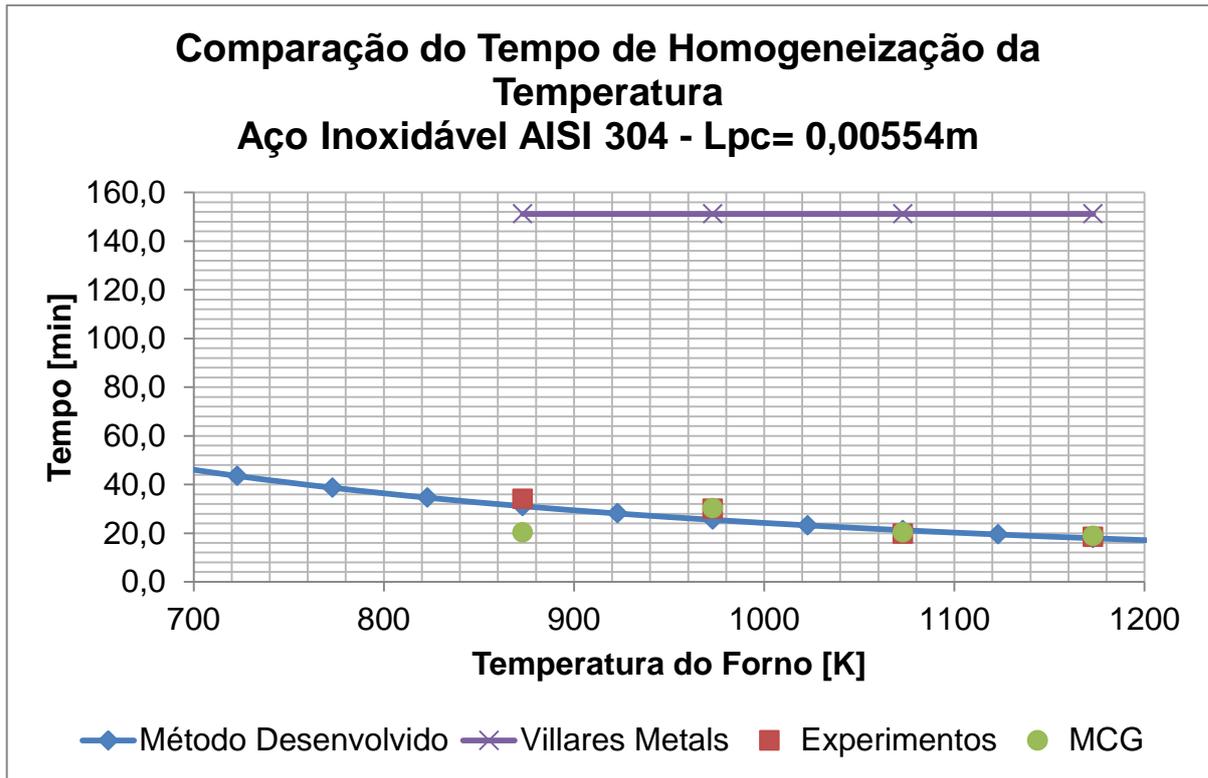


Gráfico 4.13 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Inoxidável com  $L_{pc} = 0,00554m$ .

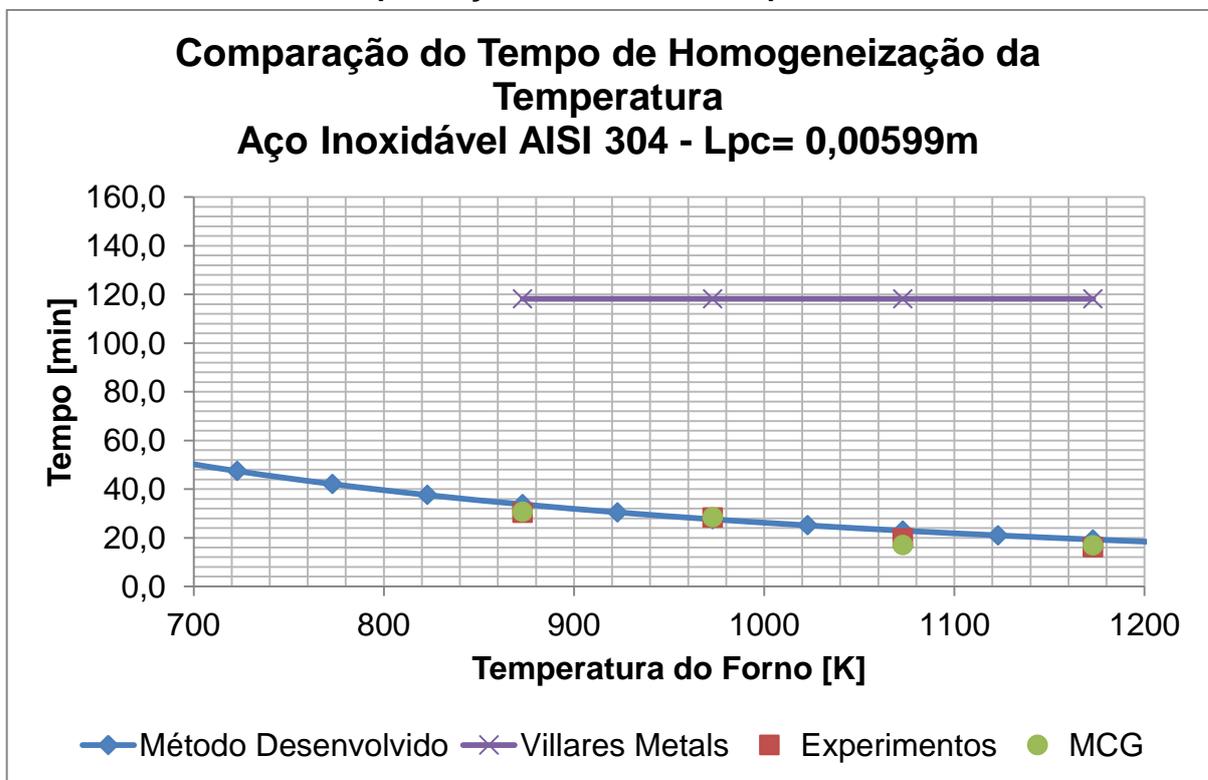


Gráfico 4.14 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Inoxidável com  $L_{pc} = 0,00599m$ .

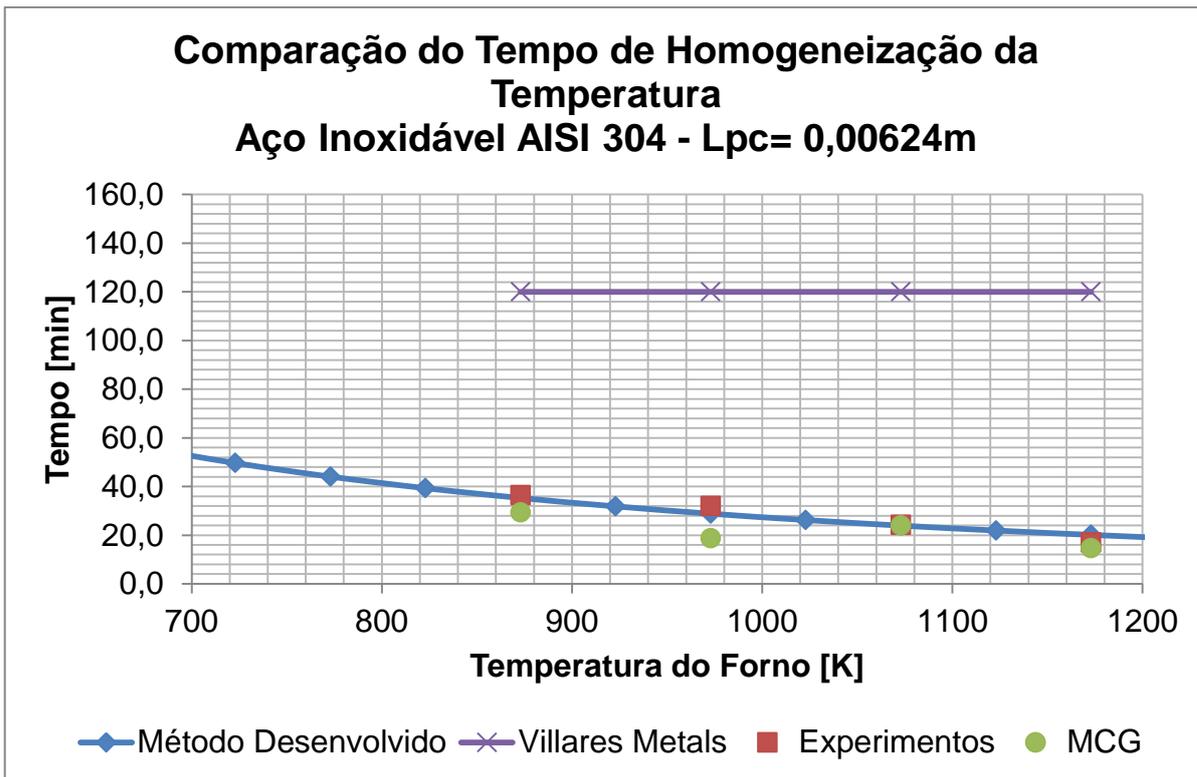


Gráfico 4.15 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Inoxidável com  $L_{pc}=0,00624m$ .

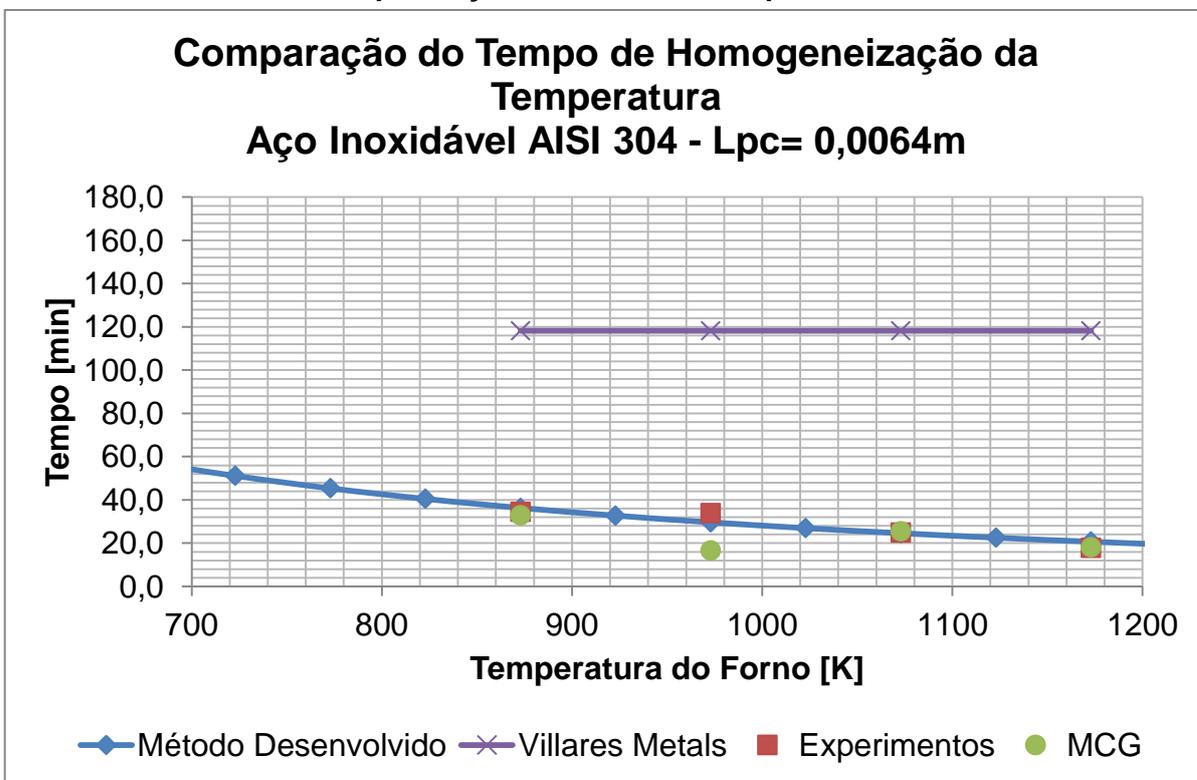


Gráfico 4.16 - Comparativo Entre o Modelo Desenvolvido, MCG e Aproximação Villares Metals para Aço Inoxidável com  $L_{pc}=0,0064m$ .

Exceto em alguns casos específicos, como por exemplo, nos gráficos 4.13, 4.15 e 4.16, onde ocorre uma divergência em alguns pontos quando o tempo de homogeneização é calculado pelo Método da Capacitância Global, fato já justificado neste trabalho, é possível perceber que os tempos calculados por este método oferecem resultados bem próximos dos valores reais que também são apresentados nos gráficos.

Além disso, é possível notar que o modelo desenvolvido mantém-se com valores próximos aos reais, o que é muito bom se comparado às estimativas apresentadas nos gráficos, definidas nos catálogos da empresa Villares Metals, e satisfatório se comparado com as soluções pelo MCG, tendo em vista que estas soluções, pelo MCG, realizam algumas simplificações que o modelo desenvolvido não necessita. Também, o modelo desenvolvido, por ser baseado em uma função, é capaz de abranger uma faixa maior de resultados possíveis, em contrapartida às soluções pelo MCG, que demandam conhecimentos específicos e resolvem casos isolados, conforme a necessidade.

Em suma, o modelo desenvolvido apresenta resultados tão bons quanto à solução analítica do problema estudado, o Método da Capacitância Global, condensando toda a álgebra do MCG em uma única equação, a qual apesar de não ser trivial é mais simplesmente resolvida do que a solução do MCG.

O apêndice F apresenta as curvas de relação do tempo de homogeneização com a temperatura para um forno com comprimento característico de 0,03m e uma tabela com as mesmas informações, ambos obtidos através do modelo desenvolvido. Estes resultados podem ser utilizados para determinar o tempo de homogeneização de modo mais simples e prático.

## 5 CONCLUSÕES

Após a realização das etapas experimentais do projeto, as seguintes conclusões foram obtidas:

- Para o aço AISI 1045, o aumento do comprimento característico causou o aumento no tempo de homogeneização da temperatura para todas as temperaturas avaliadas. Para o aço AISI 304, esta relação não foi verificada, visto que não houve variação estatisticamente significativa do tempo de homogeneização com a variação do comprimento característico;
- Observou-se como comportamento geral que quanto maior a temperatura no interior do forno, menor é o tempo necessário para se atingir a homogeneização da mesma no interior da peça;
- Para todas as temperaturas e comprimentos característicos avaliados, o tempo necessário para homogeneização da temperatura é sempre maior para o aço inoxidável AISI 304 do que para o aço carbono AISI 1045, evidenciando a influência das propriedades térmicas dos materiais com este comportamento;
- Foi obtido um modelo matemático para o tempo de homogeneização da temperatura em peças nos interior de fornos de tratamento térmico satisfatório que abrange todas as condições experimentais analisadas no trabalho, cujos resultados mostram que as relações empíricas utilizadas na prática industrial são geralmente superestimadas;
- Comparando os resultados do modelo desenvolvido com os obtidos pela solução do Método da Capacitância Global, os resultados do modelo apresentaram coerência quanto aos valores calculados analiticamente, entretanto a equação desenvolvida mostra-se de mais simples resolução se comparada a equivalente analítica.

Enfim, os resultados deste trabalho atenderam as expectativas dos seus realizadores, pois tanto a equação foi desenvolvida quanto apresenta resultados úteis e aplicáveis, além da comparação com a solução analítica do problema ter mostrado que a mesma é satisfatória.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode derivar-se em outros, tais como:

- Estudar a validade da equação desenvolvida neste trabalho para outros materiais;
- Estudar a validade da equação desenvolvida para outras geometrias;
- Estudar a validade da equação desenvolvida para outras faixas de temperatura, especialmente temperaturas mais baixas;
- Estudar a validade da equação desenvolvida para fornos de grandes dimensões;
- Estudar o efeito da mudança de fase sobre o tempo de homogeneização da temperatura;
- Validar a equação desenvolvida, através da realização de um número maior de experimentos;
- Analisar o efeito do pré-aquecimento da peça, na equação desenvolvida;
- Desenvolver um programa computacional, que forneça o tempo de homogeneização da temperatura com base na equação desenvolvida.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples**, E230, 2012.
- BEJAN, Adrian, **Transferência de Calor**, 1 ed. São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 1996.
- CALLISTER, William D.; RETHWISCH David G., **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**, 8 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2012.
- Catálogo da empresa Villares Metals. Disponível em <[http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/996\\_PTB\\_HTML.htm](http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/996_PTB_HTML.htm)>. Acesso em 18 jan. 2014.
- CHIAVERINI, Vicente, **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos principais tipos**, 7 ed. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012.
- ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A., **Termodinâmica**, 3 ed. Lisboa, McGraw-Hill, 2001.
- FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J.; MCDONALD, Alan T., **Introdução a Mecânica dos Flúidos**, 7 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2010.
- INCROPERA, Frank P.; *et al.*, **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 6 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2012.
- LEVINE, David M.; *et al.*, **Estatística: Teoria e Aplicações**, 6 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2012.
- MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N., **Princípios da Termodinâmica para Engenharia**, 4 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2002.
- RUGGIERO, Márcia A. G.; LOPES, Vera L. R., **Cálculo Numérico: Aspectos teóricos e Computacionais**, 2 ed. São Paulo, Makron Books, 1997.
- WHITE, Frank M., **Mecânica dos Flúidos**, 4 ed. Rio de Janeiro, McGraw-Hill, 2002.

## ANEXO A – TABELA DE CONVERSÃO DA TENSÃO EM TEMPERATURA PARA O TERMOPAR TIPO K

Temperatura em Graus Celsius (ITS-90)											
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tensão em Milivolts [mV]											
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
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	9.252	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	18.345	18.388	18.431	18.473	18.516
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	22.605	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

Continuação...

°C	Temperatura em Graus Celsius (ITS-90)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tensão em Milivolts [mV]											
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

Fonte: Adaptado da ASTM-E230 Tabela 14.

## APÊNDICE A – TABELA DE DADOS BRUTOS DOS EXPERIMENTOS

Código da Amostra	Temperatura do Forno (°C)	Tempo (min)	Código da Amostra	Temperatura do Forno (°C)	Tempo (min)
AC1	600	14,80	AC1	800	15,33
	600	15,63		800	14,80
	600	15,38		800	15,32
	600	15,57		800	15,00
AC2	600	16,73	AC2	800	15,57
	600	17,27		800	15,07
	600	17,33		800	15,60
	600	16,32		800	16,72
AC3	600	16,98	AC3	800	16,48
	600	17,53		800	16,73
	600	17,80		800	16,72
	600	18,02		800	17,58
AC4	600	19,28	AC4	800	17,38
	600	19,52		800	18,25
	600	20,23		800	18,02
	600	18,87		800	18,87
AC1	700	16,05	AC1	900	10,27
	700	14,45		900	10,93
	700	15,27		900	11,42
	700	14,88		900	10,90
AC2	700	16,37	AC2	900	11,23
	700	15,38		900	12,50
	700	15,47		900	11,23
	700	15,13		900	11,17
AC3	700	17,05	AC3	900	13,28
	700	17,38		900	13,45
	700	16,47		900	12,75
	700	16,32		900	12,70
AC4	700	17,75	AC4	900	14,07
	700	17,37		900	13,92
	700	17,82		900	13,10
	700	17,90		900	13,62

Continuação...

<b>Código da Amostra</b>	<b>Temperatura do Forno (°C)</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Código da Amostra</b>	<b>Temperatura do Forno (°C)</b>	<b>Tempo (min)</b>
AI1	600	34,23	AI1	800	21,12
	600	33,92		800	19,78
	600	34,97		800	19,25
	600	32,88		800	19,02
AI2	600	30,18	AI2	800	23,85
	600	29,50		800	18,48
	600	30,52		800	18,40
	600	30,67		800	18,17
AI3	600	34,68	AI3	800	25,92
	600	37,65		800	25,03
	600	36,52		800	21,65
	600	36,80		800	24,23
AI4	600	33,07	AI4	800	27,67
	600	31,00		800	25,20
	600	38,47		800	21,45
	600	35,42		800	24,87
AI1	700	26,88	AI1	900	17,58
	700	27,50		900	20,28
	700	32,75		900	19,98
	700	32,50		900	16,03
AI2	700	25,98	AI2	900	14,98
	700	26,32		900	17,18
	700	30,77		900	16,52
	700	30,13		900	15,63
AI3	700	36,78	AI3	900	20,83
	700	30,57		900	15,73
	700	31,52		900	15,67
	700	28,92		900	15,78
AI4	700	36,27	AI4	900	22,17
	700	37,67		900	17,78
	700	30,37		900	16,37
	700	30,88		900	14,92

## APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA

**Tabela B 1 - Resumo da Média dos Tempos de Homogeneização**

		<b>AC1</b>	<b>AC2</b>	<b>AC3</b>	<b>AC4</b>	<b>AI1</b>	<b>AI2</b>	<b>AI3</b>	<b>AI4</b>
<b>600°C</b>	<b>Média</b>	15,35	16,91	17,58	19,48	34,00	30,22	36,41	34,49
	<b>Desvio padrão</b>	0,38	0,48	0,45	0,57	0,87	0,52	1,25	3,21
	<b>Limite inferior do intervalo de confiança</b>	14,72	16,12	16,84	18,53	32,57	29,36	34,34	29,18
	<b>Limite superior do intervalo de confiança</b>	15,97	17,70	18,32	20,42	35,43	31,08	38,48	39,80
<b>700°C</b>	<b>Média</b>	15,16	15,59	16,80	17,71	29,91	28,30	31,95	33,80
	<b>Desvio padrão</b>	0,68	0,54	0,50	0,24	3,15	2,50	3,40	3,71
	<b>Limite inferior do intervalo de confiança</b>	14,04	14,69	15,98	17,32	24,70	24,17	26,33	27,66
	<b>Limite superior do intervalo de confiança</b>	16,29	16,48	17,63	18,10	35,11	32,43	37,57	39,93
<b>800°C</b>	<b>Média</b>	15,11	15,74	16,88	18,13	19,79	19,73	24,21	24,80
	<b>Desvio padrão</b>	0,26	0,70	0,48	0,61	0,94	2,75	1,84	2,56
	<b>Limite inferior do intervalo de confiança</b>	14,68	14,59	16,08	17,12	18,24	15,17	21,17	20,57
	<b>Limite superior do intervalo de confiança</b>	15,54	16,89	17,68	19,14	21,35	24,28	27,25	29,02
<b>900°C</b>	<b>Média</b>	10,88	11,53	13,05	13,68	18,47	16,08	17,00	17,81
	<b>Desvio padrão</b>	0,47	0,65	0,38	0,43	2,03	0,97	2,55	3,13
	<b>Limite inferior do intervalo de confiança</b>	10,10	10,47	12,42	12,97	15,12	14,48	12,78	12,63
	<b>Limite superior do intervalo de confiança</b>	11,66	12,60	13,67	14,38	21,82	17,68	21,23	22,99

Tabela B 2 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AC1

RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
600	4	61,38	15,35	0,14		
700	4	60,65	15,16	0,46		
800	4	60,45	15,11	0,07		
900	4	43,52	10,88	0,22		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	56,30	3,00	18,77	83,88	0,00	3,49
Dentro dos grupos	2,68	12,00	0,22			
Total	58,99	15,00				
Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
600//700	0,18	0,237	0,993	Média não é diferente		
600//800	0,23	0,237	0,993	Média não é diferente		
600//900	4,47	0,237	0,993	Média Diferente		
700//800	0,05	0,237	0,993	Média não é diferente		
700//900	4,28	0,237	0,993	Média Diferente		
800//900	4,23	0,237	0,993	Média Diferente		

Tabela B 3 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AC2

<b>RESUMO</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
600	4	67,65	16,91	0,23		
700	4	62,35	15,59	0,29		
800	4	62,95	15,74	0,49		
900	4	46,13	11,53	0,42		
<b>ANOVA</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	66,21	3,00	22,07	62,01	0,00	3,49
Dentro dos grupos	4,27	12,00	0,36			
Total	70,48	15,00				
<b>Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer</b>						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
600//700	1,33	0,298	1,253	Média diferente		
600//800	1,18	0,298	1,253	Média não é diferente		
600//900	5,38	0,298	1,253	Média Diferente		
700//800	0,15	0,298	1,253	Média não é diferente		
700//900	4,05	0,298	1,253	Média Diferente		
800//900	4,20	0,298	1,253	Média Diferente		

Tabela B 4 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AC3

<b>RESUMO</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
600	4	70,33	17,58	0,20		
700	4	67,22	16,80	0,25		
800	4	67,52	16,88	0,23		
900	4	52,18	13,05	0,14		
<b>ANOVA</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	50,51	3,00	16,84	81,50	0,00	3,49
Dentro dos grupos	2,48	12,00	0,21			
Total	52,99	15,00				
<b>Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer</b>						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
600//700	0,78	0,227	0,954	Média não é diferente		
600//800	0,7	0,227	0,954	Média não é diferente		
600//900	4,54	0,227	0,954	Média Diferente		
700//800	0,07	0,227	0,954	Média não é diferente		
700//900	3,76	0,227	0,954	Média Diferente		
800//900	3,83	0,227	0,954	Média Diferente		

Tabela B 5 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AC4

<b>RESUMO</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
600	4	77,90	19,48	0,33		
700	4	70,83	17,71	0,06		
800	4	72,52	18,13	0,38		
900	4	54,70	13,68	0,18		
<b>ANOVA</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	74,86	3,00	24,95	106,32	0,00	3,49
Dentro dos grupos	2,82	12,00	0,23			
Total	77,67	15,00				
<b>Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer</b>						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
600//700	1,77	0,242	1,017	Média Diferente		
600//800	1,35	0,242	1,017	Média Diferente		
600//900	5,80	0,242	1,017	Média Diferente		
700//800	0,42	0,242	1,017	Média não é diferente		
700//900	4,03	0,242	1,017	Média Diferente		
800//900	4,45	0,242	1,017	Média Diferente		

**Tabela B 6 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 600°C nas amostras de Aço Carbono**

<b>RESUMO</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
AC1	4	61,38	15,35	0,14		
AC2	4	67,65	16,91	0,23		
AC3	4	70,33	17,58	0,20		
AC4	4	77,90	19,48	0,33		
<b>ANOVA</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	35,12	3,00	11,71	52,08	0,00	3,49
Dentro dos grupos	2,70	12,00	0,22			
Total	37,81438	15				
<b>Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer</b>						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
AC1// AC2	1,57	0,237	0,996	Média Diferente		
AC1// AC3	2,24	0,237	0,996	Média Diferente		
AC1// AC4	4,13	0,237	0,996	Média Diferente		
AC2// AC3	0,67	0,237	0,996	Média não é diferente		
AC2// AC4	2,56	0,237	0,996	Média Diferente		
AC3// AC4	1,89	0,237	0,996	Média Diferente		

**Tabela B 7 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 700°C nas amostras de Aço Carbono**

<b>RESUMO</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
AC1	4	60,65	15,16	0,46		
AC2	4	62,35	15,59	0,29		
AC3	4	67,22	16,80	0,25		
AC4	4	70,83	17,71	0,06		
<b>ANOVA</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	16,15	3,00	5,38	20,32	0,00	3,49
Dentro dos grupos	3,18	12,00	0,26			
Total	19,33222	15				
<b>Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer</b>						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
AC1// AC2	0,43	0,257	1,081	Média não é diferente		
AC1// AC3	1,64	0,257	1,081	Média Diferente		
AC1// AC4	2,55	0,257	1,081	Média Diferente		
AC2// AC3	1,22	0,257	1,081	Média Diferente		
AC2// AC4	2,12	0,257	1,081	Média Diferente		
AC3// AC4	0,90	0,257	1,081	Média não é diferente		

**Tabela B 8 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 800°C nas amostras de Aço Carbono**

<b>RESUMO</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
AC1	4	60,45	15,11	0,07		
AC2	4	62,95	15,74	0,49		
AC3	4	67,52	16,88	0,23		
AC4	4	72,52	18,13	0,38		
<b>ANOVA</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	21,20	3,00	7,07	24,33	0,00	3,49
Dentro dos grupos	3,49	12,00	0,29			
Total	24,68326	15				
<b>Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer</b>						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
AC1// AC2	0,63	0,269	1,132	Média não é diferente		
AC1// AC3	1,77	0,269	1,132	Média Diferente		
AC1// AC4	3,02	0,269	1,132	Média Diferente		
AC2// AC3	1,14	0,269	1,132	Média Diferente		
AC2// AC4	2,39	0,269	1,132	Média Diferente		
AC3// AC4	1,25	0,269	1,132	Média Diferente		

**Tabela B 9 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 900°C nas amostras de Aço Carbono**

<b>RESUMO</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
AC1	4	43,52	10,88	0,22		
AC2	4	46,13	11,53	0,42		
AC3	4	52,18	13,05	0,14		
AC4	4	54,70	13,68	0,18		
<b>ANOVA</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	20,21	3,00	6,74	27,98	0,00	3,49
Dentro dos grupos	2,89	12,00	0,24			
Total	23,09833	15				
<b>Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer</b>						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
AC1// AC2	0,65	0,245	1,030	Média não é diferente		
AC1// AC3	2,17	0,245	1,030	Média Diferente		
AC1// AC4	2,80	0,245	1,030	Média Diferente		
AC2// AC3	1,51	0,245	1,030	Média Diferente		
AC2// AC4	2,14	0,245	1,030	Média Diferente		
AC3// AC4	0,63	0,245	1,030	Média não é diferente		

Tabela B 10 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AI1

RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
600	4	136,00	34,00	0,75		
700	4	119,63	29,91	9,91		
800	4	79,17	19,79	0,88		
900	4	73,88	18,47	4,10		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	694,68	3,00	231,56	59,19	0,00	3,49
Dentro dos grupos	46,95	12,00	3,91			
Total	741,63	15,00				
Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
600//700	4,09	0,989	4,154	Média não é diferente		
600//800	14,21	0,989	4,154	Média Diferente		
600//900	15,53	0,989	4,154	Média Diferente		
700//800	10,12	0,989	4,154	Média Diferente		
700//900	11,44	0,989	4,154	Média Diferente		
800//900	1,32	0,989	4,154	Média não é diferente		

Tabela B 11 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AI2

<b>RESUMO</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
600	4	120,87	30,22	0,27		
700	4	113,20	28,30	6,25		
800	4	78,90	19,73	7,58		
900	4	64,32	16,08	0,94		
<b>ANOVA</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	549,83	3,00	183,28	48,75	0,00	3,49
Dentro dos grupos	45,11	12,00	3,76			
Total	594,94	15,00				
<b>Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer</b>						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
600//700	1,92	0,969	4,072	Média não é diferente		
600//800	10,49	0,969	4,072	Média Diferente		
600//900	14,14	0,969	4,072	Média Diferente		
700//800	8,58	0,969	4,072	Média Diferente		
700//900	12,22	0,969	4,072	Média Diferente		
800//900	3,65	0,969	4,072	Média não é diferente		

Tabela B 12 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AI3

<b>RESUMO</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
600	4	145,65	36,41	1,56		
700	4	127,78	31,95	11,55		
800	4	96,83	24,21	3,38		
900	4	68,02	17,00	6,52		
<b>ANOVA</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	880,60	3,00	293,53	51,00	0,00	3,49
Dentro dos grupos	69,06	12,00	5,75			
Total	949,66	15,00				
<b>Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer</b>						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
600//700	4,47	1,199	5,038	Média não é diferente		
600//800	12,20	1,199	5,038	Média Diferente		
600//900	19,41	1,199	5,038	Média Diferente		
700//800	7,74	1,199	5,038	Média Diferente		
700//900	14,94	1,199	5,038	Média Diferente		
800//900	7,20	1,199	5,038	Média Diferente		

Tabela B 13 - ANOVA para a Variação da Temperatura para o Ensaio AI4

<b>RESUMO</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
600	4	137,96	34,49	10,30		
700	4	135,18	33,80	13,78		
800	4	99,18	24,80	6,53		
900	4	71,23	17,81	9,81		
<b>ANOVA</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	758,16	3,00	252,72	25,01	0,00	3,49
Dentro dos grupos	121,27	12,00	10,11			
Total	879,43	15,00				
<b>Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer</b>						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
600//700	0,69	1,590	6,676	Média não é diferente		
600//800	9,69	1,590	6,676	Média Diferente		
600//900	16,68	1,590	6,676	Média Diferente		
700//800	9,00	1,590	6,676	Média Diferente		
700//900	15,99	1,590	6,676	Média Diferente		
800//900	6,99	1,590	6,676	Média Diferente		

**Tabela B 14 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 600°C nas amostras de Aço Inoxidável**

<b>RESUMO</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
AI1	4	136,00	34,00	0,76		
AI2	4	120,87	30,22	0,27		
AI3	4	145,65	36,41	1,56		
AI4	4	137,96	34,49	10,30		
<b>ANOVA</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	80,70	3,00	26,90	8,35	0,00	3,49
Dentro dos grupos	38,66	12,00	3,22			
Total	119,36	15,00				
<b>Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer</b>						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
AI1// AI2	3,78	0,897	3,769	Média Diferente		
AI1// AI3	2,41	0,897	3,769	Média não é diferente		
AI1// AI4	0,49	0,897	3,769	Média não é diferente		
AI2// AI3	6,19	0,897	3,769	Média Diferente		
AI2// AI4	4,27	0,897	3,769	Média Diferente		
AI3// AI4	1,92	0,897	3,769	Média não é diferente		

**Tabela B 15 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 700°C nas amostras de Aço Inoxidável**

RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
AI1	4	119,63	29,91	9,91		
AI2	4	113,20	28,30	6,25		
AI3	4	127,78	31,95	11,55		
AI4	4	135,18	31,80	13,78		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	68,77	3,00	22,92	2,21	0,14	3,49
Dentro dos grupos	124,48	12,00	10,17			
Total	193,25	15,00				
Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
AI1// AI2	1,61	1,610	6,764	Média não é diferente		
AI1// AI3	2,04	1,610	6,764	Média não é diferente		
AI1// AI4	3,89	1,610	6,764	Média não é diferente		
AI2// AI3	3,65	1,610	6,764	Média não é diferente		
AI2// AI4	5,50	1,610	6,764	Média não é diferente		
AI3// AI4	1,85	1,610	6,764	Média não é diferente		

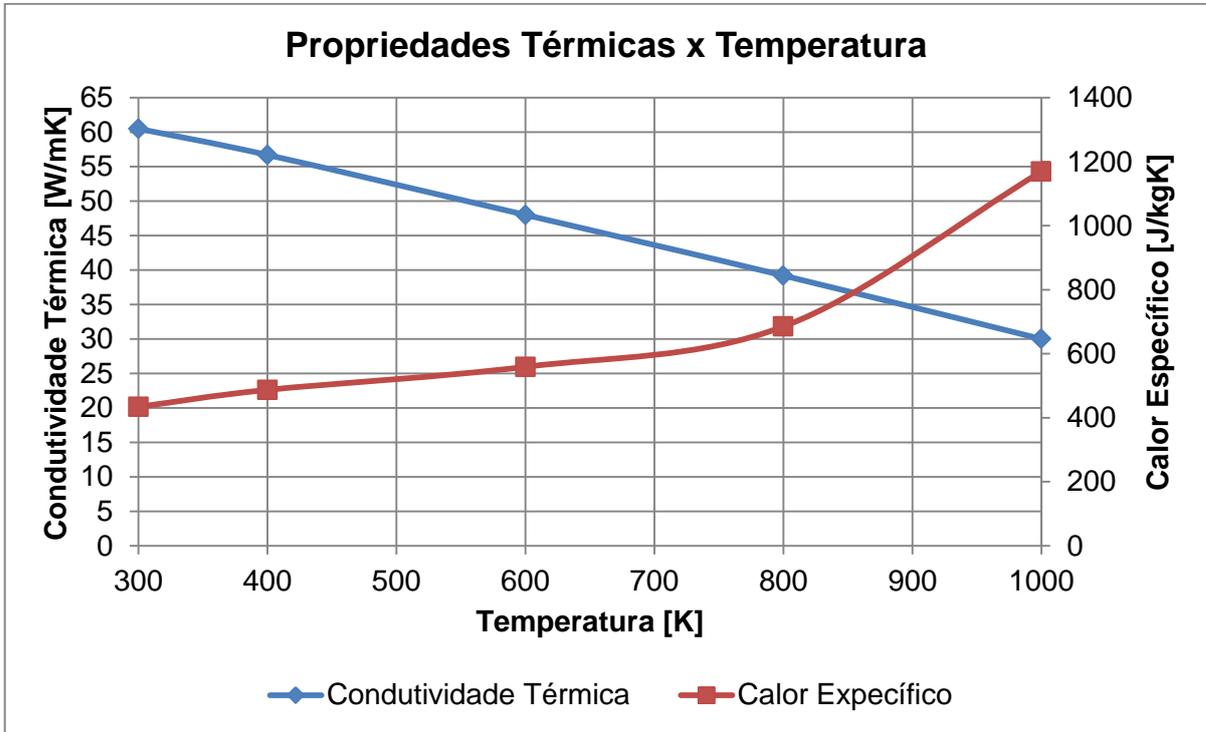
**Tabela B 16 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 800°C nas amostras de Aço Inoxidável**

<b>RESUMO</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
AI1	4	79,17	19,79	0,88		
AI2	4	78,90	19,73	7,58		
AI3	4	96,83	24,21	3,38		
AI4	4	99,18	24,80	6,53		
<b>ANOVA</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	90,71	3,00	30,24	6,58	0,01	3,49
Dentro dos grupos	55,14	12,00	4,60			
Total	145,85	15,00				
<b>Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer</b>						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
AI1// AI2	0,07	1,072	4,502	Média não é diferente		
AI1// AI3	4,42	1,072	4,502	Média não é diferente		
AI1// AI4	5,00	1,072	4,502	Média Diferente		
AI2// AI3	4,48	1,072	4,502	Média não é diferente		
AI2// AI4	5,07	1,072	4,502	Média Diferente		
AI3// AI4	0,59	1,072	4,502	Média não é diferente		

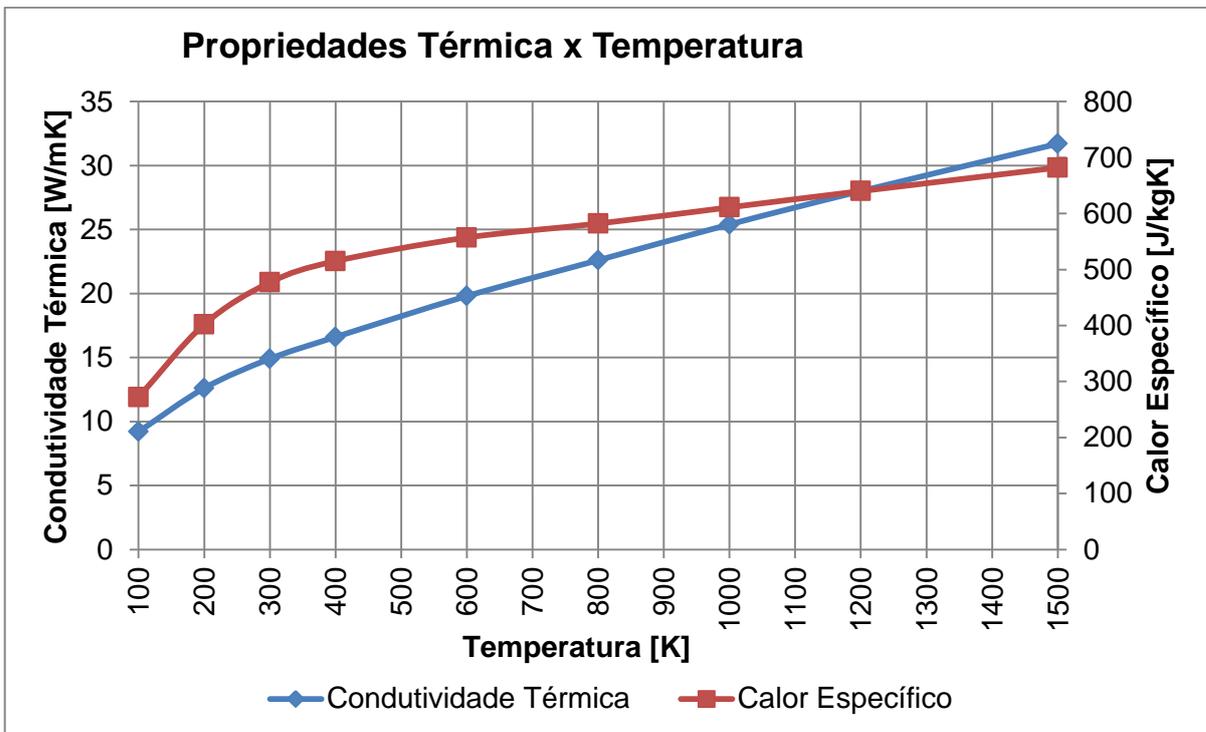
**Tabela B 17 - ANOVA para a Variação do Comprimento Característico para a Temperatura de 900°C nas amostras de Aço Inoxidável**

RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
AI1	4	73,88	18,47	4,10		
AI2	4	64,32	16,08	0,94		
AI3	4	68,02	17,00	6,52		
AI4	4	71,23	17,81	9,81		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	12,80	3,00	4,27	0,80	0,52	3,49
Dentro dos grupos	64,10	12,00	5,34			
Total	76,91	15,00				
Comparações Múltiplas de Tukey-Kramer						
<i>Comparação</i>	<i>Diferença Absoluta</i>	<i>Erro Padrão da diferença</i>	<i>Intervalo Crítico</i>	<i>Resultado</i>		
AI1// AI2	2,39	1,156	4,854	Média não é diferente		
AI1// AI3	1,47	1,156	4,854	Média não é diferente		
AI1// AI4	0,66	1,156	4,854	Média não é diferente		
AI2// AI3	0,93	1,156	4,854	Média não é diferente		
AI2// AI4	1,73	1,156	4,854	Média não é diferente		
AI3// AI4	0,80	1,156	4,854	Média não é diferente		

## APÊNDICE C – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS



**Gráfico C. 1 - Propriedades térmicas do Aço Carbono AISI 1045**  
 Fonte: Adaptado da Tabela A1 do Apêndice A (INCROPERA *et al.*, 2012)



**Gráfico C. 2 - Propriedades térmicas do Aço Inoxidável AISI 304**  
 Fonte: Adaptado da Tabela A1 do Apêndice A (INCROPERA *et al.*, 2012)

Tabela C. 1 - Propriedades dos Materiais para Cada Ensaio

Código do ensaio	Cp [J/kgK]	K [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Temperatura de Filme [K]
AC1-600°C	592,62	48,50	7854	583
AC1-700°C	632,42	46,32	7854	633
AC1-800°C	674,89	44,13	7854	683
AC1-900°C	720,21	41,95	7854	733
AC2-600°C	592,62	48,50	7854	583
AC2-700°C	632,42	46,32	7854	633
AC2-800°C	674,89	44,13	7854	683
AC2-900°C	720,21	41,95	7854	733
AC3-600°C	592,62	48,50	7854	583
AC3-700°C	632,42	46,32	7854	633
AC3-800°C	674,89	44,13	7854	683
AC3-900°C	720,21	41,95	7854	733
AC4-600°C	592,62	48,50	7854	583
AC4-700°C	632,42	46,32	7854	633
AC4-800°C	674,89	44,13	7854	683
AC4-900°C	720,21	41,95	7854	733
AI1-600°C	547,24	20,11	7900	583
AI1-700°C	558,88	20,87	7900	633
AI1-800°C	569,63	21,59	7900	683
AI1-900°C	579,62	22,29	7900	733
AI2-600°C	547,24	20,11	7900	583
AI2-700°C	558,88	20,87	7900	633
AI2-800°C	569,63	21,59	7900	683
AI2-900°C	579,62	22,29	7900	733
AI3-600°C	547,24	20,11	7900	583
AI3-700°C	558,88	20,87	7900	633
AI3-800°C	569,63	21,59	7900	683
AI3-900°C	579,62	22,29	7900	733
AI4-600°C	547,24	20,11	7900	583
AI4-700°C	558,88	20,87	7900	633
AI4-800°C	569,63	21,59	7900	683
AI4-900°C	579,62	22,29	7900	733

## APÊNDICE D – DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO

Para a determinação do coeficiente convectivo é utilizada a equação D.1 (INCROPERA *et al.*, 2012, p.164), de modo que durante a execução dos experimentos foi realizado um único experimento para o qual a temperatura foi medida de minuto em minuto até que ocorresse a homogeneização.

$$t = \frac{\rho V c_p}{h A_s} \cdot \ln(\theta^*)$$

$$-\ln(\theta^*) = \frac{h}{\rho L_c c_p} \cdot t$$

**Eq. (D.1)**

Onde:

$h$  = Coeficiente Convectivo ou de Película [  $W/m^2K$  ];

$A_s$  = Área superficial [  $m^2$  ];

$T_\infty$  = Temperatura da corrente fluída [  $K$  ];

$T$  = Temperatura no interior do sólido em qualquer instante de tempo [  $K$  ];

$\rho$  = Massa Específica [  $kg/m^3$  ];

$c_p$  = Calor específico [  $J/kgK$  ];

$V$  = Volume [  $m^3$  ];

$L_c$  = Comprimento Característico [  $m$  ];

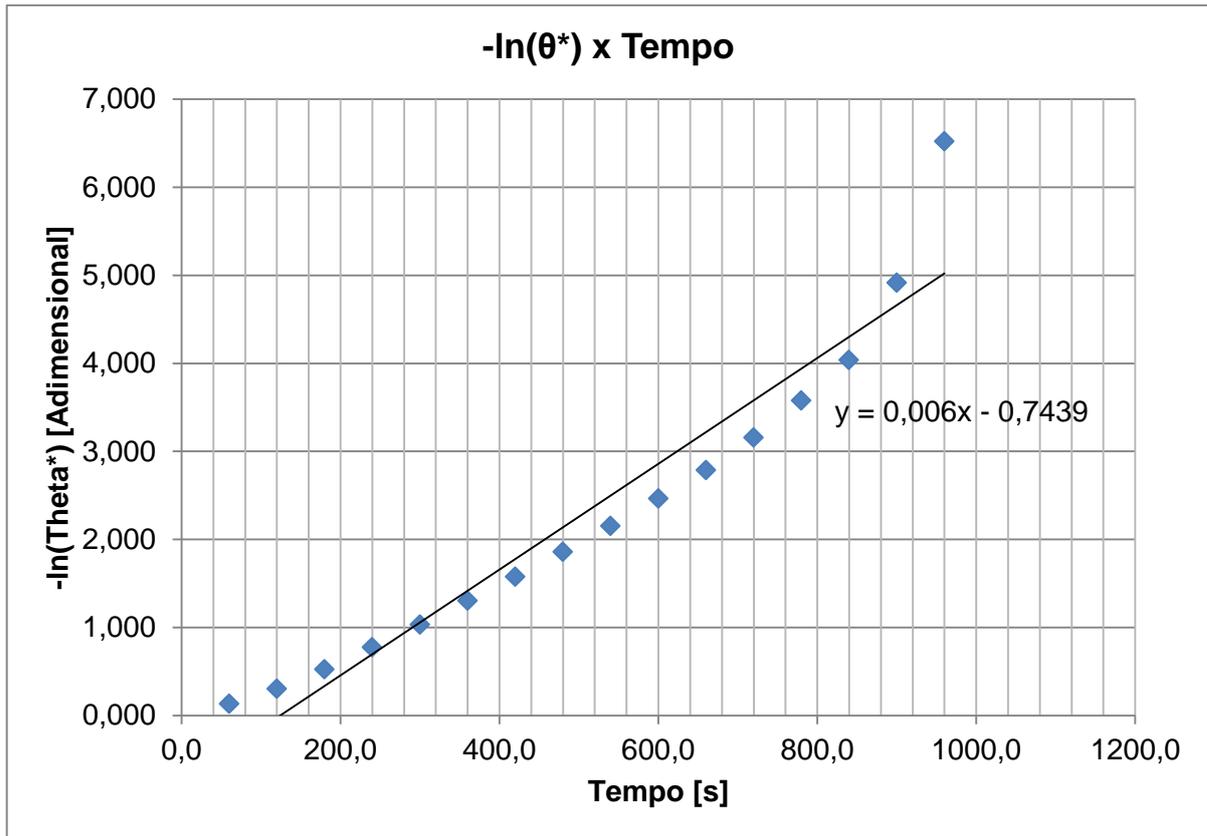
$T_0$  = Temperatura inicial [  $K$  ];

$t$  = Tempo [  $s$  ].

E  $(\theta^*)$  é definido da seguinte forma:

$$\theta^* = \frac{T_0 - T_\infty}{T - T_\infty}$$

Sendo assim, com os dados do experimento já citado e a equação D.1, temos o gráfico D.1.



**Gráfico D. 1 - Relação obtida experimentalmente entre  $-\ln(\theta^*)$  e tempo**

Com o gráfico D.1 através de uma simples regressão linear executada no programa *Microsoft Excel*® obtém-se a reta  $y = 0,006 \cdot t - 0,7439$ , fazendo esta reta igual à equação D.1, temos que:  $\frac{h}{\rho L_c c_p} \cong 0,006$ , sabendo que os valores das propriedades dos materiais são conhecidos e que o comprimento característico da peça experimentada é igual a 0,00624m o valor do coeficiente convectivo é  $186 \frac{W}{m^2 K}$ .

## APÊNDICE E – REGRESSÃO MÚLTIPLA

**Tabela E. 1 - Escolha do Melhor Subconjunto**

Modelo	Cp	K+1	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustado	Erro Padrão
$\Pi_2$	46,0013	2	0,4242	0,4050	314367
$\Pi_3$	99,2122	2	0,0102	-0,0228	412175
$\Pi_4$	92,0484	2	0,0659	0,0348	400402
$\Pi_5$	58,5843	2	0,3263	0,3038	340046
$\Pi_2, \Pi_3$	46,6937	3	0,4344	0,3954	316904
$\Pi_2, \Pi_3$	7,7782	3	0,7372	0,7190	216022
$\Pi_2, \Pi_4$	8,3266	3	0,7329	0,7145	217768
$\Pi_2, \Pi_5$	91,1571	3	0,0884	0,0255	402312
$\Pi_3, \Pi_4$	56,1254	3	0,3610	0,3169	336835
$\Pi_3, \Pi_5$	15,4018	3	0,6779	0,6556	239160
$\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$	3,7979	4	0,7837	0,7605	199437
$\Pi_2, \Pi_3, \Pi_5$	5,9761	4	0,7668	0,7418	207103
$\Pi_2, \Pi_4, \Pi_5$	9,7677	4	0,7373	0,7091	219811
$\Pi_3, \Pi_4, \Pi_5$	15,6135	4	0,6918	0,6587	238079
$\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5$	5,0000	5	0,7899	0,7588	200160

A determinação da tabela E.1 foi realizada através do programa *Microsoft Excel*®, nesta tabela estão apresentados os valores dos coeficientes de determinação ajustados que servem de referência para a escolha do melhor subconjunto. No caso apresentado na tabela E.1, o melhor subconjunto é o subconjunto que envolve os grupos  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$  e  $\Pi_4$ , visto que, seu valor é o mais próximo de 1 dentre as combinações de grupos Pi.

Depois de realizada a escolha do melhor subconjunto é necessário conhecer os coeficientes da equação que relaciona as variáveis, que estão apresentados na tabela E.2.

**Tabela E. 2 - Coeficientes da Regressão Múltipla**

	Coeficiente
Constante	-4,474E6
$\Pi_2$	11,395E6
$\Pi_3$	0,319E6
$\Pi_4$	159,92

Com o melhor subconjunto escolhido bem como os coeficientes da equação apresentados na tabela E.2 é então possível determinar a abrangência da equação. Para tanto é necessário determinar o valor do Fator Inflacionário de Variância (FIV) para cada uma das variáveis em relação às demais, isto está apresentado nas tabelas E.3 a E.5.

**Tabela E. 3 - Fator Inflacionário de Variância de  $\Pi_2$  em relação aos demais**

<b>Estatísticas da Regressão</b>	
R Múltiplo	0,4016
R <sup>2</sup>	0,1613
R <sup>2</sup> Ajustado	0,1034
Erro Padrão	0,0308
Experimentos	32
<b>FIV</b>	<b>1,192307044</b>

**Tabela E. 4 - Fator Inflacionário de Variância de  $\Pi_3$  em relação aos demais**

<b>Estatísticas da Regressão</b>	
R Múltiplo	0,1977
R <sup>2</sup>	0,0391
R <sup>2</sup> Ajustado	-0,0272
Erro Padrão	0,2845
Experimentos	32
<b>FIV</b>	<b>1,040664257</b>

**Tabela E. 5 - Fator Inflacionário de Variância de  $\Pi_4$  em relação aos demais**

<b>Estatísticas da Regressão</b>	
R Múltiplo	0,4347
R <sup>2</sup>	0,1890
R <sup>2</sup> Ajustado	0,1330
Erro Padrão	1557,3449
Experimentos	32
<b>FIV</b>	<b>1,232971302</b>

Enfim pode-se inferir que a equação desenvolvida (Equação 4.1), produto deste processo de regressão possui abrangência satisfatória, de modo que o fator inflacionário da variância é próximo a 1 para todas as variáveis.

## APÊNDICE F – DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE HOMOGENEIZAÇÃO DA TEMPERATURA

**Tabela F. 1 - Tempo de Homogeneização da Temperatura**

Temperatura [°C]	Comprimento Característico [m]	Aço Carbono AISI 1045 [min]	Aço Inoxidável AISI 304 [min]
<b>300</b>	0,001	11,6	17,4
	0,002	17,0	26,2
	0,003	22,3	35,6
	0,004	27,9	46,2
	0,005	33,9	58,0
	0,006	40,4	71,1
	0,007	47,3	85,6
	0,008	54,6	101,3
<b>400</b>	0,001	10,3	15,0
	0,002	14,2	21,4
	0,003	17,9	28,1
	0,004	21,7	35,7
	0,005	25,8	44,2
	0,006	30,3	53,9
	0,007	35,1	64,6
	0,008	40,3	76,5

<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Comprimento Característico [m]</b>	<b>Aço Carbono AISI 1045 [min]</b>	<b>Aço Inoxidável AISI 304 [min]</b>
<b>500</b>	0,001	9,4	13,3
	0,002	12,3	18,1
	0,003	14,9	22,9
	0,004	17,5	28,5
	0,005	20,4	34,8
	0,006	23,6	42,1
	0,007	27,1	50,4
	0,008	30,9	59,7
<b>600</b>	0,001	8,7	12,0
	0,002	10,9	15,6
	0,003	12,7	19,2
	0,004	14,6	23,3
	0,005	16,7	28,1
	0,006	19,0	33,8
	0,007	21,7	40,3
	0,008	24,7	47,8
<b>700</b>	0,001	8,2	10,9
	0,002	9,9	13,7
	0,003	11,2	16,4
	0,004	12,6	19,5
	0,005	14,1	23,2
	0,006	15,9	27,6
	0,007	18,1	32,9
	0,008	20,6	39,1

Temperatura [°C]	Comprimento Característico [m]	Aço Carbono AISI 1045 [min]	Aço Inoxidável AISI 304 [min]
<b>800</b>	0,001	7,8	10,1
	0,002	9,2	12,3
	0,003	10,1	14,2
	0,004	11,1	16,5
	0,005	12,3	19,4
	0,006	13,8	22,9
	0,007	15,7	27,3
	0,008	18,1	32,5
<b>900</b>	0,001	7,5	9,4
	0,002	8,6	11,1
	0,003	9,3	12,5
	0,004	10,1	14,2
	0,005	11,2	16,4
	0,006	12,6	19,3
	0,007	14,5	22,9
	0,008	16,8	27,3
<b>1000</b>	0,001	7,3	8,9
	0,002	8,2	10,1
	0,003	8,8	11,1
	0,004	9,6	12,3
	0,005	10,6	14,1
	0,006	12,1	16,4
	0,007	14,0	19,5
	0,008	16,5	23,3

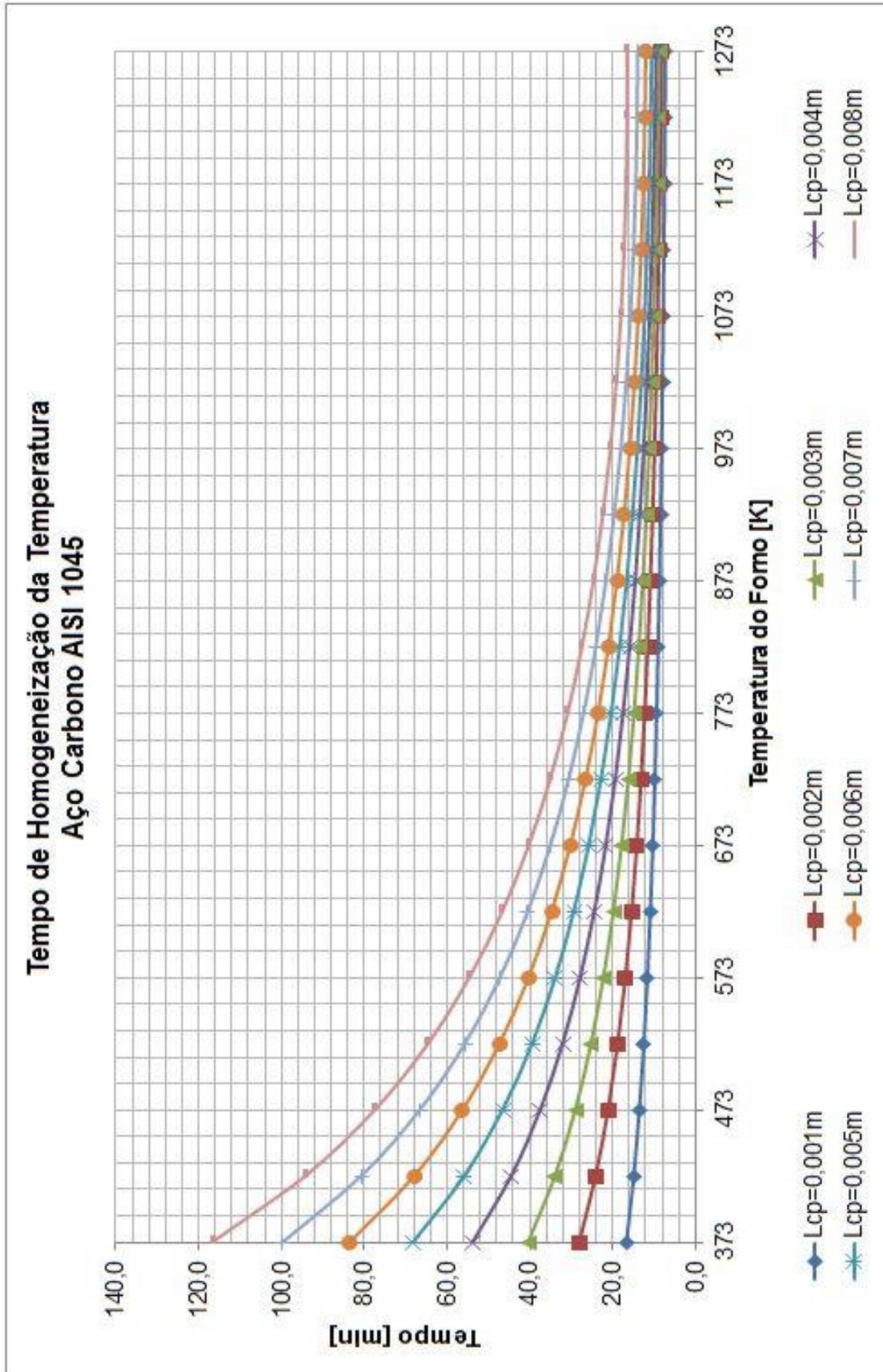


Gráfico F. 1 - Tempo de Homogeneização da Temperatura Aço Carbono

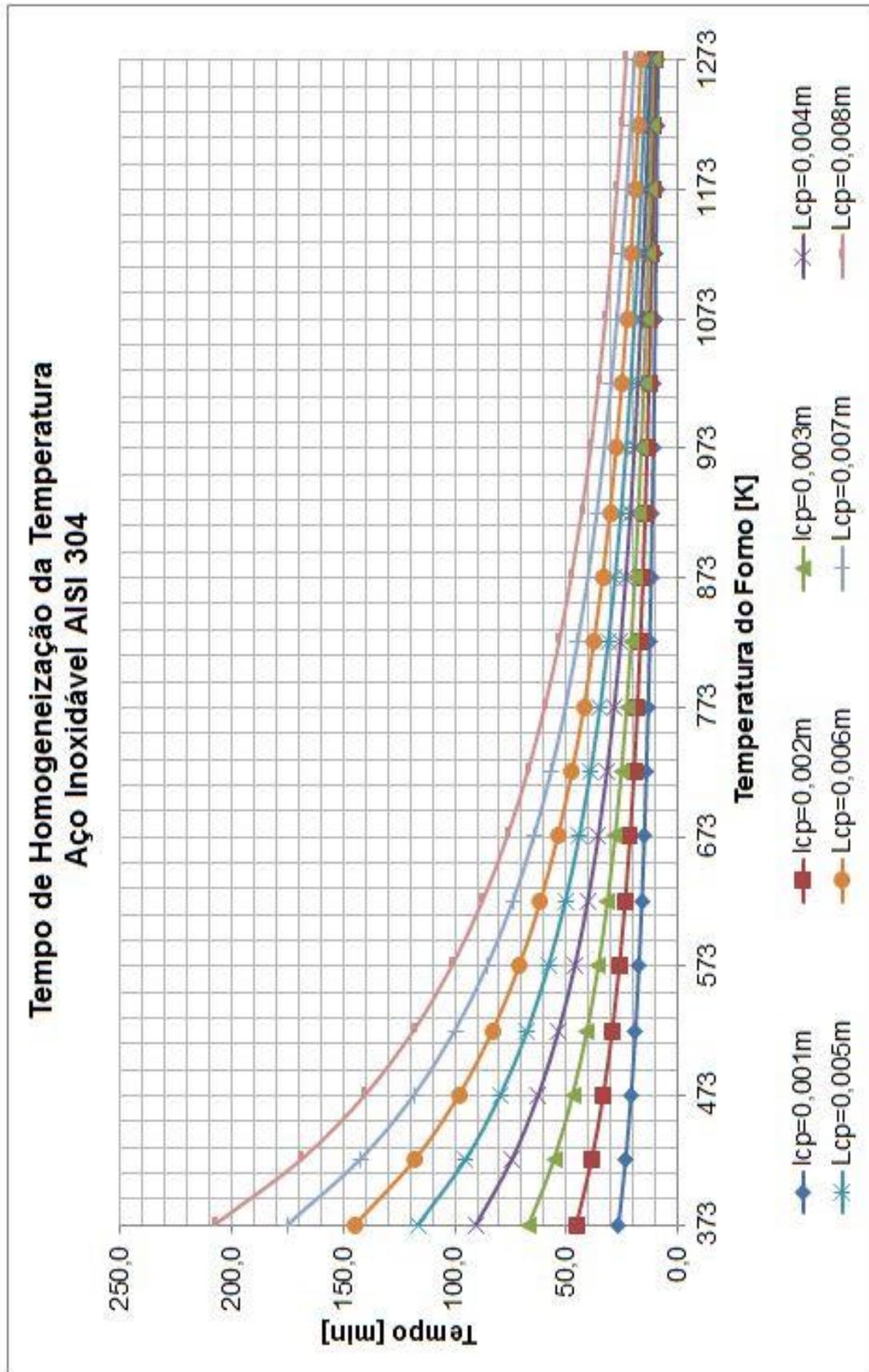


Gráfico F. 2 - Tempo de Homogeneização da Temperatura Aço Inoxidável