

FERNANDO COSTA MALHEIROS

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO
COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM FORNO ELÉTRICO



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2013

FERNANDO COSTA MALHEIROS

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO
COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM FORNO
ELÉTRICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Guimarães

Uberlândia
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil

M249a Malheiros, Fernando Costa, 1986-
2013 Análise teórica e experimental do comportamento térmico de um forno
elétrico / Fernando Costa Malheiros. - 2013.
73 f. : il.

Orientador: Gilmar Guimarães.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pro-
grama de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia Mecânica - Teses. 2. Forno elétricos - Aquecimento
- Teses. I. Guimarães, Gilmar. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título

CDU: 621

FOLHA DE APROVAÇÃO.

À vida que meus pais me deram.
À cumplicidade construída com a Fernanda.

Agradecimentos

Aos meus irmãos pela confiança.

Ao pessoal do laboratório pelo apoio.

Aos amigos da FEMEC, docentes, técnico-administrativos e discentes.

Especialmente, ao professor Gilmar, por todo o tempo, atenção, experiência e apoio dedicados à minha formação e à construção deste trabalho.

Às agências financiadoras CAPES e CNPq.

Malheiros, F. C. **Análise Teórica e Experimental do Comportamento Térmico de um Forno Elétrico**. 2013. 73f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Resumo

Este trabalho avalia teórica e experimentalmente o comportamento térmico de um forno elétrico. Inicialmente dedica-se à construção de um experimento que represente o uso comum de um forno elétrico doméstico e possibilite adquirir informações da evolução das temperaturas das paredes do forno e da amostra aquecendo em seu interior. Este comportamento térmico é avaliado e usado para se calcular os fluxos de calor por radiação e convecção que atinge a amostra em cada face. Em seguida, propõe-se um problema inverso que é minimizado (otimizado) por algoritmo genético cujo objetivo é estimar o perfil do fluxo de radiação e convecção calculados. Os resultados de temperaturas são apresentados para cada superfície do forno e da amostra. Já os fluxos são apresentados em suas componentes de convecção, de radiação e fluxo total que é soma dos dois para cada superfície da amostra. A estimativa do problema inverso é apresentada junto ao fluxo total calculado a partir das temperaturas do experimento. O forno conseguiu imprimir uma temperatura uniforme na superfície da amostra, porém em grandezas menores que as setadas. O problema inverso apresentou resultados satisfatórios para a otimização de fornos. Uma vez que ele necessita apenas da medição de temperaturas na superfície da amostra, se torna um procedimento mais simples para o cálculo dos fluxos de calor ideal que visa a uniformidade do aquecimento. Porém, a utilização de critérios na obtenção das propriedades e na construção do modelo térmico direto são necessários.

Palavras chave: otimização em fornos, comportamento térmico de forno, Temperatura de fornos, radiação térmica

Malheiros, F. C. **Theoretical and experimental analysis of the thermal behavior of an electric oven.** 2013. 73f. Master's Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Abstract

This study investigates the thermal behavior of an electric oven under theoretical and experimental conditions. Initially, it is dedicated to building an experiment which reflects the everyday use of a household electric oven and which makes it possible to gather information on the development of temperatures for oven walls and for the sample being heated. Such thermal behavior is evaluated and used to calculate radiation and convection heat flow rates applied to each of the sample's faces. Afterwards, an opposite problem which is minimized (optimized) by means of a genetic algorithm whose objective is to estimate the pattern of the radiation and convection flow rate calculated is proposed. The Temperatures results for each of the surfaces of the oven's and sample's are presented. The flow rates, on the other hand, are presented in terms of their convection and radiation components, and the total flow rate, which is the sum of both of them, for each of the sample's surface. An estimate for the opposite problem is presented alongside the total flow rate calculated from the temperatures of the experiment. The oven managed to apply a uniform temperature to the surface of the samples, although at rates lower than the ones set up. The opposite problem showed satisfactory results for the optimization of ovens. Since it only requires temperatures from the surface of the sample to be measured, the procedure for the calculation of optimal flow rates turns out to be simpler because it aims at achieving heat uniformity. However, the use of criteria for the determination of the properties and for the construction of the thermal model is required.

Keywords: oven's optimization, thermal behavior of an oven, oven's temperature, thermal radiation

Lista de Figuras

3.1	Imagem geral do problema estudado	10
3.2	Proposição do volume de controle para o problema estudado.	12
3.3	Balanço no volume de controle da superfície do corpo de prova.	12
3.4	Troca de calor entre duas superfícies no interior de uma cavidade.	13
3.5	Parâmetros para definição do fator de forma entre duas superfícies quaisquer.	14
3.6	Fator de forma em superfícies retangulares paralelas. (Adaptadas de (EHLERT; SMITH, 1993))	14
3.7	Fator de forma em superfícies perpendiculares. (Adaptadas de (EHLERT; SMITH, 1993))	15
3.8	Camada limite para o calculo de convecção natural em uma superfície vertical.	17
3.9	Convecção em placa horizontal com fonte quente na face de cima.(Adaptadas de (BERGMAN et al., 2011))	17
3.10	Convecção em placa horizontal com fonte quente na face de baixo.(Adaptadas de (BERGMAN et al., 2011))	18
3.11	Esboço do corpo de prova.	19
3.12	Balanço de energia em um problema de condução 1D	21
4.1	Forno elétrico Brastemp®), modelo BOB61A carregado com o corpo de prova e com termopares.	26
4.2	Temperaturas ambiente e nas paredes do forno para um experimento de <i>3h25min</i> com o forno vazio.	27
4.3	Corpo de prova montado com uma massa de concreto no interior de uma forma de alumínio.	28
4.4	Balanço de energia no volume de controle	28
4.5	Descrição dos nomes das paredes do forno	29

4.6	Descrição dos nomes das paredes do corpo de prova	30
4.7	Temperatura da base do forno para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	31
4.8	Temperatura do topo do forno para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	32
4.9	Temperatura do ar no interior da cavidade do forno para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	33
4.10	Temperatura da lateral direita do forno para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	34
4.11	Temperatura da lateral esquerda do forno para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	35
4.12	Temperatura na tampa do forno para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	36
4.13	Temperatura no fundo do forno para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	37
4.14	Temperatura da base do corpo de prova para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	38
4.15	Temperatura do topo do corpo de prova para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	39
4.16	Temperatura da lateral direita do corpo de prova para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	40
4.17	Temperatura na lateral esquerda do corpo de prova para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	41
4.18	Temperatura na face da frente do corpo de prova para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	42
4.19	Temperatura do fundo do corpo de prova para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	43
4.20	Esboço da bancada experimento de calibração dos termopares	44
4.21	Curva de calibração para o termopar 1. (0.9963×-0.8099 e $R = 99.474\%$)	44
4.22	Curva de calibração para o termopar 2. (0.9963×-0.8099 e $R = 99.1935\%$)	45
4.23	Curva de calibração para o termopar 3. (0.9963×-0.8099 e $R = 99.1095\%$)	46
4.24	Curva de calibração para o termopar 4. (0.9963×-0.8099 e $R = 99.4901\%$)	47
5.1	Nomenclatura usada nas superfícies da amostra.	48
5.2	Fluxos de calor total, por radiação e convecção na base do corpo de prova para os experimentos setados em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	50
5.3	Fluxos de calor total, por radiação e convecção no topo do corpo de prova para os experimentos setados em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	51

5.4	Fluxos de calor total, por radiação e convecção na lateral direita do corpo de prova para os experimentos setados em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	52
5.5	Fluxos de calor total, por radiação e convecção na lateral esquerda do corpo de prova para os experimentos setados em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	53
5.6	Fluxos de calor total, por radiação e convecção na frente do corpo de prova para os experimentos setados em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	54
5.7	Fluxos de calor total, por radiação e convecção no fundo do corpo de prova para os experimentos setados em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$	55
6.1	Problema 1D do tipo fluxo-fluxo na direção Z.	58
6.2	Fluxos estimados e calculados na base do corpo de prova para o forno setado em $120^{\circ}C$	65
6.3	Fluxos estimados e calculados no topo do corpo de prova para o forno setado em $120^{\circ}C$	66
6.4	Fluxos estimados e calculados na base do corpo de prova para o forno setado em $210^{\circ}C$	67
6.5	Fluxos estimados e calculados no topo do corpo de prova para o forno setado em $210^{\circ}C$	68
6.6	Fluxos estimados e calculados na base do corpo de prova para o forno setado em $300^{\circ}C$	69
6.7	Fluxos estimados e calculados no topo do corpo de prova para o forno setado em $300^{\circ}C$	70

Lista de Tabelas

4.1	Ordem dos experimentos geradas aleatoriamente.	25
4.2	Temperaturas medidas no topo do forno para o tempo de 1500 segundos nos experimentos setados em $210^{\circ}C$	28
6.1	Propriedades térmicas do bloco de concreto usado como parâmetro para construção do modelo direto	57

Sumário

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Introdução	3
2.2	Literatura clássica em problemas de condução de calor	3
2.3	Literatura clássica em problemas de convecção de calor	4
2.4	Literatura clássica em problemas de radiação de calor	5
2.5	Uma breve revisão da análise de distribuição de temperatura e otimização em fornos.	6
3	Fundamentação Teórica	10
3.1	Proposição do problema	10
3.1.1	Descrição Física	10
3.1.2	Abordagem	11
3.1.3	Determinação do volume de controle	11
3.1.4	Conservação da energia no volume de controle	11
3.2	Radiação térmica no problema proposto	12
3.2.1	Fator de Forma	13
3.2.1.1	Fator de forma para superfícies retangulares paralelas	14
3.2.1.2	Fator de forma para superfície retangulares perpendiculares sem plano de intersecção	15
3.3	Convecção térmica no problema proposto	16
3.3.1	Convecção natural em uma superfície vertical	16
3.3.2	Convecção natural em superfície horizontal	17

3.4	Condução de calor no problema proposto	18
3.4.1	Modelo de condução de calor no corpo de prova	18
3.4.2	Modelo direto de condução de calor no corpo de prova	21
4	Montagem Experimental	24
4.1	Descrição do Experimento	24
4.2	Descrição do forno	25
4.3	Descrição da amostra (corpo de prova)	26
4.4	Métodos Estatísticos aplicados	26
4.5	Temperaturas medidas nos experimentos	29
4.5.1	Temperaturas medidas no ar e nas paredes do forno	30
4.5.2	Temperaturas medidas nas superfícies do corpo de prova	34
4.6	Calibração dos termopares	40
5	Análise dos fluxos de calor por radiação e convecção térmica em uma amostra no interior de um forno	48
5.1	Fluxos de calor encontrados	49
6	Uso do método dos Algoritmos genéticos na solução de problemas inversos aplicados a fornos	56
6.1	Abordagem do problema: estimativa do perfil de evolução do fluxo de calor total nas superfícies da amostra	56
6.2	Parte I - Problema direto	57
6.3	Parte II - Problema inverso	60
6.3.1	Algoritmo genético	61
6.4	Resultados e análise	62
6.4.1	Estimativa do perfil de evolução do fluxo de calor total devido a convecção e radiação. Uso de um fator k para correção de parâmetros físicos indeterminados no modelo térmico	62
6.4.1.1	Experimento setado em $120^{\circ}C$	64
6.4.1.2	Experimento setado em $210^{\circ}C$	64
6.4.1.3	Experimento setado em $300^{\circ}C$	65
6.5	Conclusões sobre o uso de algoritmo genético na solução de problemas inversos	66

7 Conclusões	71
7.1 Sugestões para trabalhos futuros	72
Referências Bibliográficas	73

Capítulo 1

Introdução

A importância de se conhecer o funcionamento de um forno doméstico está no grande número de unidades em uso fazendo com que qualquer pequena intervenção se torne significativa. Qual o impacto de uma redução de apenas 1% no consumo de energia de um forno? Que benefícios econômicos e ambientais tal redução provocaria? Esta foi uma motivação para este trabalho: o fato de que as respostas trouxessem algum benefício social. Em outro aspecto, quanto um melhor funcionamento de um forno ajudaria na obtenção de produtos com melhor qualidade.

O objetivo de um forno é aquecer uma amostra e mantê-la a uma dada temperatura. Neste trabalho, buscou-se avaliar o comportamento térmico do forno, da amostra no seu interior, da contribuição do fluxo de calor por convecção e radiação, e de uma avaliação do forno por problema inverso.

No capítulo dois apresenta-se uma revisão bibliográfica clássica dos processos de condução, convecção e radiação térmica e de trabalhos que avaliam o desempenho dos fornos e seus componentes.

No capítulo três apresentam-se definições do processo, do volume de controle e de conceitos e equações que servirão de base para a solução dos problemas propostos ao longo deste trabalho.

O capítulo quatro contém uma descrição detalhada do forno, do corpo de prova e do procedimento experimental, apresentando os resultados das temperaturas nas paredes do forno e do corpo de prova. Além disso, uma descrição dos métodos estatísticos usados para a elaboração dos resultados, seguido pelas curvas de calibração dos termopares utilizados no

experimento.

O capítulo cinco apresenta os resultados dos fluxos de calor por radiação e convecção que atingem o corpo de prova e uma análise para as observações acerca dos resultados obtidos.

No capítulo seis aplica-se o método dos algoritmos genéticos como ferramenta de convergência de um problema inverso. Aborda-se, neste capítulo, um modelo térmico de condução para o corpo de prova, definições acerca da fundamentação de problemas inversos, explicações e definições sobre os princípios dos algoritmos genéticos. Apresentam-se os resultados calculados por problema inverso e uma análise que explicam os resultados encontrados.

O capítulo sete apresenta as conclusões deste trabalho e propostas de trabalhos futuros para um melhor entendimento e avaliação dos fornos domésticos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Apresenta-se neste capítulo uma breve revisão da literatura clássica que envolve os processos de condução, convecção e radiação térmicas, seguido da apresentação de trabalho que envolvem a análise de temperatura e otimização em fornos.

2.2 Literatura clássica em problemas de condução de calor

O fenômeno de transferência de calor por condução ocorre em um grande número de processos de engenharia e em condições muito variadas. As análises e soluções desses problemas dependem das condições às quais os processos estão submetidos. Como consequência, existem vários métodos de solução de problemas envolvendo este fenômeno.

Arpaci(1966) descreve em seu livro *Conduction Heat Transfer* problemas e soluções de problemas de transferência de calor por condução usando, principalmente, os métodos de separação de variáveis, transformada de Laplace e o Teorema de Duhamel, apresentando-os nas formulações diferencial, integral e global. Além de mostrar diversos métodos de solução, o seu trabalho tem forte tendência à caracterização física dos problemas.

Özişik(1993)em seu livro *Heat Conduction* aborda, principalmente, problemas homogêneos de transferência de calor por condução apresentando soluções em coordenadas cartesi-

anas, cilíndricas e esféricas. O autor aborda de forma muito completa o método de solução por separação de variáveis, além de apresentar exemplos de solução de problemas usando séries de Fourier. Özişik(1993) apresenta também, soluções pelos métodos de transformada de Laplace, teorema de Duhamel, Funções de Green e alguns conceitos sobre soluções de problemas inversos. Este grande número de abordagens e soluções apresentadas em seu livro *Heat Conduction* torna seu trabalho muito difundido em várias escolas de engenharia.

Beck et al.(1992)em seu livro *Heat Conduction Using Green's Function* conseguiram abordar vários problemas de transferência de calor por condução usando o método das funções de Green. Neste trabalho, usam como base os métodos de separação de variáveis e transformadas de Laplace nas soluções por funções de Green. Beck et al.(1992) apresentam soluções para vários problemas homogêneos e não-homogêneos, sujeitos a diversas condições de contorno, mostrando, a cada situação, soluções e discussões sobre possíveis inconsistências matemáticas, convergência e divergência de séries e considerações físicas. Tudo isso, torna o trabalho de grande relevância para o estudo de problemas de condução de calor.

2.3 Literatura clássica em problemas de convecção de calor

A convecção é , talvez, o fenômeno térmico mais presente na engenharia como mecanismo de troca de calor entre corpos. Vê-se aplicações em caldeiras, ventiladores, refrigeradores, aquecedores, sobre técnicas de otimização e transferência de calor em fornos, ar condicionado, entre tantos outros equipamentos e processos. Assim, diversos autores contribuem para a descrição e análise deste fenômeno.

Kays, Crawford e Weigand(2005) abordam em seu livro *Convective Heat and Mass Transfer* equacionamentos e definições básicas, princípio da conservação, tensões em fluido e linhas de corrente, solução diferencial e integral para a camada limite, escoamento laminar e turbulento em tubos e paredes, convecção em altas velocidades e outras abordagens. Todo o conteúdo é apresentado de forma didática.

Bejan(1984) em seu livro *Convection Heat Transfer* apresenta, inicialmente, conceitos básicos como a dedução das equações de conservação de massa, do momento e da energia, linhas de corrente e análises escalares. Apresenta conceitos e soluções sobre camada limite, escoamento laminar em dutos, convecção natural, convecção natural em cavidade, analisa a transição laminar-turbulento, aborda escoamento turbulento, transferência de massa e esco-

amento em meios porosos. Apresenta problemas e soluções clássicas, como similaridade de Blasius e, por fim, apresenta um capítulo sobre soluções numéricas. O livro aborda diversos problemas e soluções de forma superficial, o que não é um problema devido ao grande número e organização das referências bibliográficas e citações.

2.4 Literatura clássica em problemas de radiação de calor

A radiação é um fenômeno muito comum por se manifestar em todo corpo que tem temperatura e a transferência de energia acontece sem a necessidade de um meio ou de contato físico entre corpos. Para que ocorra troca de calor, diferentemente da emissão de energia, é necessário que exista um gradiente de temperatura entre dois ou mais corpos. As características que descrevem a radiação térmica são muito bem descritas na literatura.

O livro *Thermal Radiation Heat Transfer* de Siegel e Howell(1972), é uma referência para o processo de transferência de calor por radiação. O livro aborda desde uma descrição da natureza física das ondas eletromagnéticas, seu comportamento e propagação, passando por definições de corpo negro, propriedades de superfícies não-negras, propriedades gerais de materiais, fator de forma, definições e propriedades do corpo cinzento, uso do método de Monte Carlo na solução de problemas, processos de radiação combinada com outras formas de transferência de calor, até o comportamento radioativo dos gases com uma série de abordagens sobre este tema.

A geometria e a disposição entre superfícies que estão trocando calor por radiação, além da natureza dos materiais que as compõe, é um fator importante no processo de radiação, caracterizado como fator de forma. Dado a complexidade e diversidade das soluções de fatores de forma, uma série de títulos descreve seu conceito e apresenta, apenas, soluções simplificadas. Todavia, Howell(1982) em *Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factor* reuniu uma série de soluções de fatores de forma, apresentado situações muito utilizadas em problemas de engenharia.

A interação entre as superfícies que compõem o corpo de prova e as paredes internas do forno são caracterizadas pelo fenômeno da radiação e, portanto, serão utilizados vários conceitos e soluções da literatura acima descrita.

2.5 Uma breve revisão da análise de distribuição de temperatura e otimização em fornos.

Apresenta-se nesta seção alguns trabalhos sobre a análise do comportamento e otimização de fornos mostrando suas considerações e métodos de solução, comparando-as com as proposições e objetivos deste trabalho.

A finalidade de um forno doméstico é elevar a temperatura de um alimento até um certo nível e mantê-la em regime. Garantir uma distribuição de temperatura uniforme ao longo da cavidade do forno vazio, não necessariamente, garante uma distribuição uniforme da temperatura na superfície do alimento. A geometria irregular do alimento provoca coeficientes de convecção natural e fluxos de radiação diferentes ao longo de sua superfície. Então, para se uniformizar a temperatura em um alimento é necessário conhecer o fluxo de calor que o atinge, por qual processo esse calor se transferiu e atuar redistribuindo o calor em sua superfície.

Qual a contribuição de cada fenômeno, radiação ou convecção, no processo de aquecimento de um alimento?

Quanto de calor cada fenômeno deve contribuir para garantir uma temperatura uniforme na superfície do alimento?

O que pode ser feito para melhorar a distribuição de temperatura ao longo da superfície do alimento?

A literatura disponibiliza alguns trabalhos relativos à distribuição de temperatura na cavidade de fornos. Navaneethakrishnan, Srinivasan e Dhandapani(2008) apresentam resultados da distribuição de temperatura em um forno doméstico por meio de análise experimental e simulação numérica (CFD). O trabalho compara a distribuição de temperatura para três posições diferentes das fontes quentes, na parte inferior, na vertical centralizado e nas paredes laterais. Consideram para a simulação em CFD um sistema fechado, negligenciam os efeitos de radiação, consideram o escoamento laminar e exceto para a densidade, os outros parâmetros não se alteram. Apresentam para cada uma das três disposições das fontes quentes os resultados de temperatura para doze posições no interior do forno . As temperaturas variaram de $52^{\circ}C$ a $75^{\circ}C$ nos experimentos com uma diferença em relação à simulação de $5^{\circ}C$ a $10^{\circ}C$. Obteve-se a melhor distribuição de temperatura quando as fontes quentes estavam nas paredes laterais, porém nenhum efeito de radiação foi avaliado. O volume de controle não está claramente definido e não se trabalhou para a uniformidade da temperatura na superfície

dos corpos que estão aquecendo no interior do forno.

Bin, Jiangqi e Ruibin(2009) apresentam o campo de temperatura em um forno de flexão de vidro, em determinados intervalos de tempo, por meio do método dos volumes finitos usando o software Fluent®. Avaliam em seu trabalho os efeitos de convecção e radiação térmica e ao final comparam os resultados simulados com a temperatura experimental que foi medida no centro do vidro (corpo sendo aquecido no forno), encontrando uma erro máximo de 5,5%. Concluem que a radiação é o principal modo de transferência de calor, entretanto, o volume de controle não é bem definido para esta afirmação e a comparação entre a simulação e o experimento acontece apenas com uma medição no centro do corpo aquecido, sendo que este é um material transparente e esta característica interfere no processo de absorção de calor por radiação. Este trabalho não avalia a distribuição de temperatura na superfície do corpo ou a otimização da distribuição de calor.

Alguns trabalhos avaliam propriedades ou partes específicas dos fornos. Iustinian e Maria(2009) realizam simulação numérica para analisar o comportamento da resistência elétrica e seus efeitos no processo de aquecimento do forno. Apresentam um balanço de energia em uma das paredes do forno avaliando o calor trocado por radiação e convecção com a fonte quente, além de verificarem os níveis de temperatura em cada camada que a compõe (foram feitas simulações para diversas composições e espessuras de parede). Estes efeitos foram avaliados para 3 diferentes disposições dos resistores no interior do forno. Concluiu-se que o controle da temperatura poderia ser feito por um resistor ligado constantemente com baixa potência, entretanto o tempo para alcançar o regime ficaria inviável. Na análise da radiação o fator de forma não é considerado e durante toda a simulação o forno está vazio, mostrando que o foco é alcançar o regime de temperatura apenas nos componentes do forno, não realizando qualquer análise do objeto que será aquecido no interior da cavidade.

Outros estudos apresentados na literatura avaliam a influência da geometria do forno e da distribuição das fontes quentes na homogeneização da temperatura. Billah et al.(2011) apresentam soluções de perfis de temperaturas e linhas de correntes no interior de uma cavidade por meio de simulação numérica por elementos finitos. As soluções são geradas devido à mudança de posição de um corpo gerador de calor no interior da cavidade. O problema é modelado em 2D e não avalia os efeitos de radiação térmica. Neste caso, obtém-se a melhor distribuição de temperatura quando o corpo está posicionado no centro, em relação à vertical, e um pouco deslocado acima, em relação a horizontal. Este trabalho não aborda a otimização da distribuição do calor nem os efeitos da radiação, apenas avalia os efeitos das mudanças de posição no processo de convecção.

Chopade et al.(2011) analisam os efeitos do posicionamento de um corpo 3D no interior de uma cavidade radiante(3D), usando três diferentes dimensões e 22 posições para o corpo de prova que está sempre posicionado na base da cavidade, sendo que o fluxo nas faces de contato é nulo. A análise é feita fragmentando o corpo de prova e a cavidade e otimizando o efeito radioativo em cada pequeno fragmento até encontrar as condições térmicas desejáveis. Como resultado, observou-se que várias posições apresentadas são viáveis e que para cada solução tem-se temperaturas diferentes em cada superfície da cavidade. Estas conclusões são baseadas desconsiderando os efeitos de convecção, fato que distancia a solução de problemas reais. E, também, desconsiderando a radiação na base da cavidade, descaracterizando a grande maioria dos fornos domésticos cuja fonte de calor se encontra em sua base.

Fan et al.(2010) avaliam o efeito de diferentes condições no processo de combustão e posição das chamas para um forno em escala de laboratório com queimadores nas paredes laterais. Mostram os efeitos das configurações sobre a distribuição da temperatura nas paredes do forno e a distribuição do fluxo local de calor para diversos pontos da cavidade. Apresentam resultados experimentais em comparação aos dados obtidos numericamente. Como resultado apresentam vários padrões de respostas para cada processo estudado, entretanto, não avaliam os efeitos que os padrões encontrados causariam em um corpo sendo aquecido neste forno.

Danon et al.(2011) comparam efeitos obtidos por simulação numérica e experimentos do posicionamento das chamas de um forno a gás de múltiplos queimadores. Avaliam a distribuição de temperatura obtida para cada configuração, bem como efeitos de emissão de gases de combustão e a influência de alguns parâmetros no processo, como o tipo de escoamento do gás (laminar ou turbulento). Obteve-se o melhor resultado da distribuição de temperatura quando os queimadores estavam na parte inferior da parede lateral. Este trabalho não avalia os efeitos de radiação e não analisa um corpo de prova no interior da cavidade.

Observa-se que nos trabalhos apresentados, não se obtém as respostas, de forma objetiva, para as perguntas propostas no início deste capítulo. Qual a contribuição de cada fenômeno, radiação ou convecção, no processo de aquecimento de um alimento? Quanto de calor cada fenômeno deve contribuir para garantir uma temperatura uniforme na superfície do alimento? O que pode ser feito para melhorar a distribuição de temperatura ao longo da superfície do alimento?

Buscou-se neste trabalho avaliar e responder estas perguntas para maior entendimento do objetivo do uso de um forno doméstico que é elevar a temperatura de um alimento a um

certo nível e mantê-la em regime.

Capítulo 3

Fundamentação Teórica

3.1 Proposição do problema

A proposta deste trabalho é avaliar uma amostra aquecendo-se no interior da cavidade de um forno elétrico, as influências da convecção e radiação na troca de calor e possíveis intervenções para a otimização do processo de aquecimento.

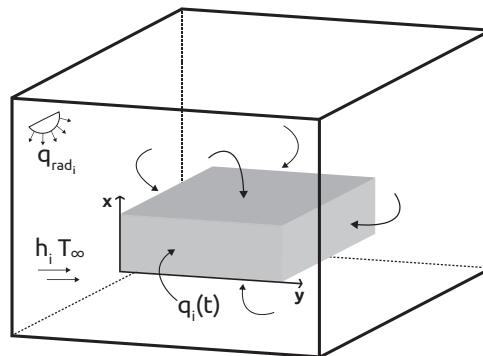


Figura 3.1: Imagem geral do problema estudado

3.1.1 Descrição Física

O corpo de prova no interior da cavidade troca energia por convecção e radiação entre o meio e as paredes, respectivamente. Assim, o aquecimento da amostra é resultado do balanço da energia absorvida e liberada em sua superfície.

3.1.2 Abordagem

A análise térmica do problema é teórica e experimental. Inicialmente concentrou-se na aquisição de um forno cúbico, na confecção de uma amostra e na montagem de um experimento que representasse o uso comum de um forno elétrico doméstico. O experimento segue as orientações de pré-aquecimento sugeridas pelo fabricante e tem o objetivo de registrar as variações de temperatura das paredes do forno, do ar e da superfície do corpo de prova durante a utilização do forno. Em seqüência, buscou-se na literatura as propriedades térmicas das superfícies e materiais utilizados no experimento e realizou-se os cálculos da contribuição dos fluxos de calor por convecção e radiação no aquecimento do corpo de prova.

Em uma outra análise usou-se a técnicas de problemas inversos. Com o objetivo de encontrar qual o fluxo de calor incidiu em cada face do corpo de prova, criou-se um modelo matemático direto de condução para o corpo de prova e aplicou-se a técnica de otimização por algoritmo genético (VANDERPLAATS, 1984).

Uma vez conhecido o comportamento térmico do forno, do corpo de prova e dos fluxos de calor que o atingem, foram propostas algumas sugestões de otimização deste processo.

3.1.3 Determinação do volume de controle

A determinação do volume de controle é a base da análise de um problema térmico determinando a modelagem e o foco da solução. A finalidade de um forno é elevar a temperatura de uma amostra a um certo nível e mantê-la em regime. Como a maioria dos fornos domésticos controla a temperatura setada pela medição da temperatura do ar no interior do forno, esta determinação pode ser uma grande fonte de erro, dado que o foco é o alimento que está se aquecendo. Assim, dada o foco e análise deste trabalho, o volume de controle foi definido na superfície da amostra como mostrado na figura 3.2.

3.1.4 Conservação da energia no volume de controle

O balanço da energia no volume de controle envolve as trocas de calor por radiação e convecção térmicas. Assim, os diversos que fluxo cruzam as fronteiras do volume de controle são avaliados, como mostrado na figura 3.3.

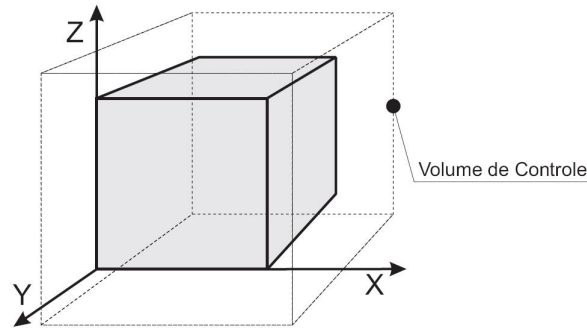


Figura 3.2: Proposição do volume de controle para o problema estudado.

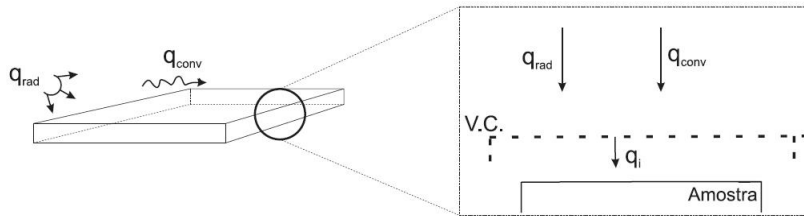


Figura 3.3: Balanço no volume de controle da superfície do corpo de prova.

3.2 Radiação térmica no problema proposto

O fenômeno da radiação acontece devido as diferenças de temperaturas entre as paredes do forno e as superfícies da carga, dependendo das propriedades dos materiais e posições relativas das superfícies (fator de forma).

A troca de calor por radiação entre dois corpos depende da diferença de temperatura entre eles, da absorvância e reflectância e da área de interação entre as superfícies que estão trocando energia.

O princípio básico deste processo é a emitância de calor por radiação que, depois das devidas considerações e simplificações, tem a seguinte equação fundamental

$$q_{rad} = \sigma T^4 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.1)$$

onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$ conhecida como constante de Stefan-Boltzmann.

A troca líquida de calor por radiação entre superfícies pode ser abordada de várias maneiras. Em particular, considerando o forno como uma cavidade, todas as superfícies como superfícies cinzentas e as paredes do forno como superfícies metálicas pintadas de negro,

tem-se, segundo (BERGMAN et al., 2011), a seguinte equação (Equação 3.2) para a troca líquida de calor entre duas superfícies no interior de uma cavidade:

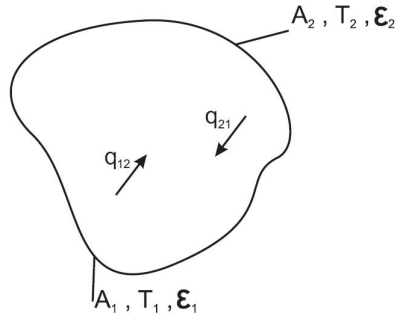


Figura 3.4: Troca de calor entre duas superfícies no interior de uma cavidade.

$$q_{12} = q_{21} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (3.2)$$

onde T_1 e T_2 são as temperaturas das superfícies 1 e 2. ε_1 e ε_2 são as emissividades das superfícies 1 e 2. E F_{12} ou F_{21} é o fator de forma entre as superfícies 1 e 2.

As emissividades ε são encontradas em BERGMAN et al.(2011), as áreas são conhecidas e as temperatura são registradas no experimento, restando apenas o cálculo do fator de forma.

3.2.1 Fator de Forma

O fator de forma é definido como a porção de radiação que sai da superfície i e é interceptada pela superfície j (3.5), cuja equação é descrita pela equação 3.3.

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (3.3)$$

A troca de calor por radiação para a base e o topo da amostra se dará com as superfícies do forno que estão perpendiculares e paralelas a elas. Para as demais superfícies da amostra a troca por radiação se dará apenas com as superfícies do forno que estão paralelas, pois a área das superfícies laterais da amostra são pequenas quando comparadas com a base e o topo e os fatores de forma para superfícies perpendiculares são pequenos quando comparados

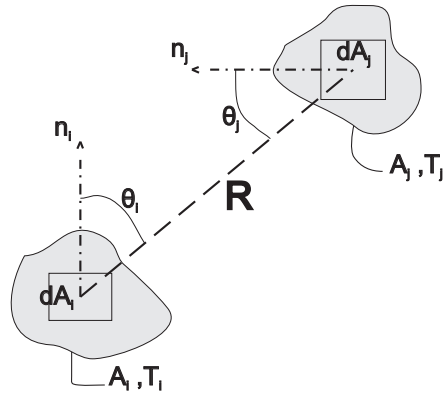


Figura 3.5: Parâmetros para definição do fator de forma entre duas superfícies quaisquer.

com superfícies paralelas. As diversas configurações com seus respectivos fatores de forma são apresentados a seguir, segundo (EHLERT; SMITH, 1993).

3.2.1.1 Fator de forma para superfícies retangulares paralelas

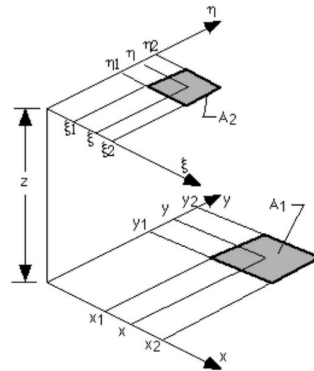


Figura 3.6: Fator de forma em superfícies retangulares paralelas. (Adaptadas de (EHLERT; SMITH, 1993))

$$F_{1-2} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \sum_{\ell=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+j+k+\ell} G(x_i, y_i, \eta_k, \xi_\ell) \quad (3.4a)$$

onde

$$G = \frac{1}{2\pi} \left\{ (y - \eta)A \arctan \left[\frac{y - \eta}{A} \right] + (x - \xi)B \arctan \left[\left(\frac{x - \xi}{B} \right) \right] - \frac{z^2}{2} \ln \left[(x - \xi)^2 + B^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (3.4b)$$

e A e B valem

$$A = [(x - \xi)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3.4c)$$

$$B = [(y - \eta)^2 + z^2] \quad (3.4d)$$

3.2.1.2 Fator de forma para superfícies retangulares perpendiculares sem plano de intersecção

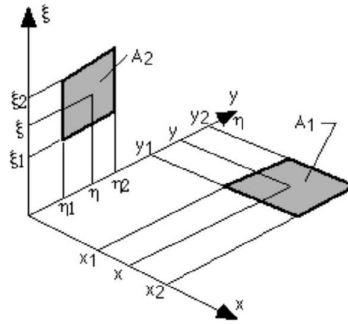


Figura 3.7: Fator de forma em superfícies perpendiculares. (Adaptadas de (EHLERT; SMITH, 1993))

$$F_{1-2} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \sum_{\ell=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+j+k+\ell} G(x_i, y_i, \eta_k, \xi_\ell) \quad (3.5a)$$

onde

$$G = \frac{1}{2\pi} \left\{ (y - \eta)(x^2 + \xi^2)^{\frac{1}{2}} \arctan(K) - \frac{1}{4} \left[(x^2 + \xi^2) \ln(1 + K^2) - (y - \eta)^2 \ln \left(1 + \frac{1}{K^2} \right) \right] \right\} \quad (3.5b)$$

e

$$K = \frac{(y - \eta)}{(x^2 + \xi^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.5c)$$

3.3 Convecção térmica no problema proposto

O problema estuda a troca de calor por convecção natural que acontece devido ao aumento da temperatura do ar ao entrar em contato com as paredes do forno e posterior contato com a superfície da carga. Ela é diretamente influenciada pela área da superfície da amostra e pelos gradientes de temperatura, como mostrado na equação 3.6.

$$q_{conv} = \bar{h}A\Delta T \quad (3.6)$$

Onde \bar{h} é o coeficiente de convecção médio na superfície, A é a área da superfície e T é a temperatura da superfície. A solução da equação 3.6 considerando a obtenção da solução do escoamento e o perfil térmico do ar no interior do forno não é simples e foge dos objetivos deste trabalho.

Neste sentido, o fenômeno foi modelado por equações empíricas obtidas da literatura (BERGMAN et al., 2011) que são funções das configurações geométricas, do tipo de escoamento e condições de aquecimento. Assim, a obtenção do coeficiente de troca de calor por convecção, \bar{h} , se dá pelo do cálculo do número de Nusselt, \overline{Nu} , ou seja:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} = C Ra_L^n \quad (3.7)$$

onde o número de Rayleigh (Ra),

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (3.8)$$

sendo, k a condutividade térmica do meio, g a aceleração da gravidade, ν a viscosidade cinemática, α a difusividade térmica, β o número de Biot, L o comprimento característico, T_s a temperatura da superfície e T_∞ a temperatura do meio.

As soluções empíricas para cada configuração são apresentadas a seguir (BERGMAN et al., 2011).

3.3.1 Convecção natural em uma superfície vertical

A análise geométrica (figura 3.8), neste caso, trata o termo L (a ser usado na equação 3.8) como o comprimento da superfície na direção vertical em relação à base, ou seja, na mesma direção da aceleração da gravidade.

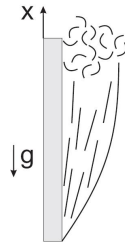


Figura 3.8: Camada limite para o calculo de convecção natural em uma superfície vertical.

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670Ra_L^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}} \quad Ra_L \leq 10^9 \quad (3.9)$$

3.3.2 Convecção natural em superfície horizontal

Para uma superfície horizontal (figura 3.10 e 3.9) o termo L (a ser usado na equação 3.8) é comprimento característico, descrito por

$$L = \frac{A_s}{P} \quad (3.10)$$

onde, A_s e P , representam, respectivamente, a área e o perímetro da superfície horizontal. Assim pode-se encontrar o \overline{Nu}_L das seguintes formas.

- Superfície quente em cima e/ou superfície fria embaixo

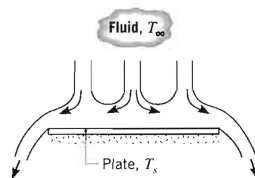


Figura 3.9: Convecção em placa horizontal com fonte quente na face de cima. (Adaptadas de (BERGMAN et al., 2011))

$$\overline{Nu}_L = 0.54Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7) \quad (3.11)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.15 Ra_L^{\frac{1}{3}} \quad (10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}) \quad (3.12)$$

- Superfície quente em baixo e/ou superfície fria em cima.

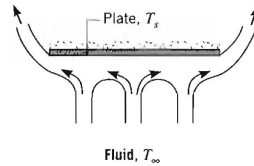


Figura 3.10: Convecção em placa horizontal com fonte quente na face de baixo.(Adaptadas de (BERGMAN et al., 2011))

$$\overline{Nu}_L = 0.27 Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}) \quad (3.13)$$

Com o valor do \overline{Nu}_L obtido, retorna-se às equações (3.7) e (3.6) e calcula-se a troca de calor por convecção.

3.4 Condução de calor no problema proposto

3.4.1 Modelo de condução de calor no corpo de prova

Neste problema modelou-se o corpo de prova pelo método de função de Green. As nomenclaturas utilizadas referem a Beck et al.(1992) e o desenvolvimento das equações são adaptadas de Fernandes(2009).

Originalmente o corpo de prova está sujeito a condições de contorno de convecção e fluxo de radiação em todas as faces, caracterizando assim um problema do tipo G33 (fluxo-convecção) em todas as direções. Sabe-se que o efeito da convecção e da radiação sobre uma superfície refletem-se a um fluxo de calor que por sua vez acarreta uma variação de temperatura. Assim, pode-se considerar que a amostra esteja exposta a fontes de calor externas que por sua vez representam a soma dos efeitos de troca de calor por convecção e radiação térmica. Neste caso, um problema 3-D originalmente G33(fluxo-convecção) será abordado como um problema 3-D G22 (fluxo-fluxo).

O modelo mostrado na figura 3.11 pode ser representado por

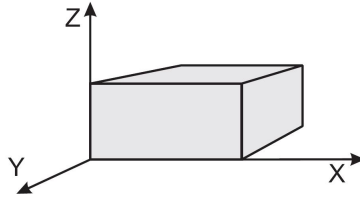


Figura 3.11: Esboço do corpo de prova.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.14a)$$

sujeito às condições de contorno

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_1 \quad +k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = q_2 \quad (3.14b)$$

$$+k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = q_3 \quad -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=W} = q_4 \quad (3.14c)$$

$$+k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_5 \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=R} = q_6 \quad (3.14d)$$

e à condição inicial

$$T(x, y, z, 0) = F(x, y, z) = T_0 \quad (3.14e)$$

A solução geral em termos de Função de Green é dada por (FERNANDES, 2009)

$$\begin{aligned}
T(x, y, z, t) = & \int_{x'=0}^L \int_{y'=0}^W \int_{z'=0}^R G(x, y, z, t|x', y', z', 0)T(x, y, z, 0)dx'dy'dz' \\
& + \frac{\alpha}{k} \int_{\tau=0}^t \int_{y=0}^W \int_{z=0}^R [q_1(\tau)G(x, y, z, t|x', W, z', \tau)] dx'dz'd\tau \\
& + \frac{\alpha}{k} \int_{\tau=0}^t \int_{x=0}^L \int_{z=0}^R [q_2(\tau)G(x, y, z, t|x', W, z', \tau)] dx'dz'd\tau \\
& + \frac{\alpha}{k} \int_{\tau=0}^t \int_{x=0}^L \int_{y=0}^W [q_3(\tau)G(x, y, z, t|x', W, z', \tau)] dx'dz'd\tau \\
& + \frac{\alpha}{k} \int_{\tau=0}^t \int_{y=0}^W \int_{z=0}^R [q_4(\tau)G(x, y, z, t|x', W, z', \tau)] dx'dz'd\tau \\
& + \frac{\alpha}{k} \int_{\tau=0}^t \int_{x=0}^L \int_{z=0}^R [q_5(\tau)G(x, y, z, t|x', W, z', \tau)] dx'dz'd\tau \\
& + \frac{\alpha}{k} \int_{\tau=0}^t \int_{x=0}^L \int_{y=0}^W [q_6(\tau)G(x, y, z, t|x', W, z', \tau)] dx'dz'd\tau
\end{aligned} \tag{3.15}$$

sendo $G(x, y, z, t|x', y', z', \tau) = G_{X22}.G_{Y22}.G_{Z22}$, dado por

$$G_{X22} = \frac{1}{L} \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\frac{m^2}{L^2}\pi^2\alpha(t-\tau)} \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{m\pi x'}{L}\right) \right] \tag{3.16}$$

$$G_{Y22} = \frac{1}{W} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{n^2}{W^2}\pi^2\alpha(t-\tau)} \cos\left(\frac{n\pi y}{W}\right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{W}\right) \right] \tag{3.17}$$

$$G_{Z22} = \frac{1}{R} \left[1 + 2 \sum_{p=1}^{\infty} e^{-\frac{p^2}{R^2}\pi^2\alpha(t-\tau)} \cos\left(\frac{p\pi z}{R}\right) \cos\left(\frac{p\pi z'}{R}\right) \right] \tag{3.18}$$

Uma vez conhecidas as componentes do fluxo de calor q_i , onde i é cada face do corpo de prova, a Eq.3.15 representa o problema direto em estudo. Como neste caso estas componentes não são conhecidas, estabelece-se o problema inverso, sendo necessário a obtenção das seis componentes de fluxo de calor.

Entretanto, uma análise mais detida nas condições físicas e geométricas do problema podem levar a algumas simplificações. Observa-se que a amostra em estudo tem razão de

aspecto ($\frac{L}{W}$) da ordem de 10 na direção Z . Assim, considerando ainda que os fluxos de calor devido convecção e radiação incidem uniformemente em cada superfície, o problema 3-D descrito pelas Eqs.(3.14,3.21 e 3.15) pode ser abordado como um problema unidimensional na direção de sua espessura. Neste caso, apenas as componentes q_1 e q_2 na direção necessitariam ser obtidas. Dado isto, a solução de um problema unidimensional é, também, apresentada a seguir.

3.4.2 Modelo direto de condução de calor no corpo de prova

Para o problema representado pela Figura 3.12, a equação 3.14 se transforma em

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.19)$$

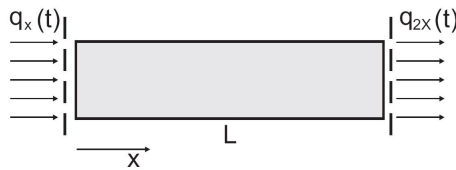


Figura 3.12: Balanço de energia em um problema de condução 1D

Sujeito às condições de contorno

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_x(t); \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = q_{2x}(t) \quad (3.20)$$

e à condição inicial

$$T(x, 0) = F(x) = T_0 \quad (3.21)$$

Tem-se a solução geral em termo de função de Green (BECK et al., 1992)

$$\begin{aligned}
T(x, t) = & T_0 \\
& + \frac{\alpha}{k} \int_0^\tau G_{X22}(x, t|x', t - \tau) \frac{q_x(\tau)}{k} \Big|_{x'=0} d\tau \\
& + \frac{\alpha}{k} \int_0^\tau G_{X22}(x, t|x', t - \tau) \frac{q_{2x}(\tau)}{k} \Big|_{x'=L} d\tau
\end{aligned} \tag{3.22}$$

A $G_{X22}(x, t|x', t - \tau)$ representa a função de Green do problema auxiliar 1D que é a versão homogênea do problema Eq.3.19. A FG, $G_{X22}(x, t|x', t - \tau)$, pode ser facilmente encontrada (Apêndice X, (BECK et al., 1992)) e escrita como

$$G_{X22}(x, t) = \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_m^\infty e^{-\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 \alpha(t-\tau)} \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{m\pi x'}{L}\right) \tag{3.23}$$

sendo $n = 1, 2, 3, \dots$

Separando-se os termos e integrando, tem-se:

$$I_1 = \frac{\alpha}{k} \int_0^\tau \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_m^\infty e^{-A_m^2 \alpha(t-\tau)} \cos(A_m x) \cos(A_m 0) q_x(\tau) d\tau \tag{3.24}$$

onde

$$A_m = \frac{m}{L} \pi \tag{3.25}$$

Ao integrar, obtém-se

$$I_1 = \frac{\alpha}{k} \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^r q_x(t_i) \Delta t + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^\infty \cos(A_m x) \frac{1}{A_m^2 \alpha} \sum_{i=1}^r q_{xi} \left[e^{(-A_m^2 \alpha(t-t_i))} - e^{(-A_m^2 \alpha(t-t_{i-1}))} \right] \right] \tag{3.26}$$

sendo r um índice discreto que representa o instante t , ou seja, $t = r \Delta t$

Assim, integrando o segundo termo da (3.22), obtem-se:

$$I_2 = \frac{\alpha}{k} \int_0^\tau \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_m^\infty e^{-A_m^2 \alpha (t-\tau)} \cos(A_m x) \cos(A_m L) q_{2x}(\tau) d\tau \quad (3.27)$$

Ou seja

$$I_2 = \frac{\alpha}{k} \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^r q_{2x}(t_i) \Delta_t + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^\infty \cos(A_m x) \cos(m\pi) \frac{1}{A_m^2 \alpha} \sum_{i=1}^r q_{2xi} \left[e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_i))} - e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_{i-1}))} \right] \right] \quad (3.28)$$

Logo, a solução geral é dada por

$$\begin{aligned} T(x, t) = T_0 &+ \frac{\alpha}{k} \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^r q_x(t_i) \Delta_t + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^\infty \cos(A_m x) \frac{1}{A_m^2 \alpha} \sum_{i=1}^r q_{xi} \left[e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_i))} - e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_{i-1}))} \right] \right] \\ &+ \frac{\alpha}{k} \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^r q_{2x}(t_i) \Delta_t + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^\infty \cos(A_m x) \cos(m\pi) \frac{1}{A_m^2 \alpha} \sum_{i=1}^r q_{2xi} \left[e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_i))} - e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_{i-1}))} \right] \right] \end{aligned} \quad (3.29)$$

Capítulo 4

Montagem Experimental

4.1 Descrição do Experimento

O experimento foi planejado para simular o uso comum de um forno elétrico doméstico, em condições limites do equipamento. Para tanto, usou-se um pré-aquecimento, variando aleatoriamente, entre 10min e 15min com toda a potência do forno e todas as resistências ligadas, segundo recomendação do fabricante. O tempo total de cada experimento variava, aleatoriamente, entre 60min a 80min. Após o aquecimento, mantinha-se apenas a resistência da base ligado e ajustava-se o forno para a temperatura desejada. Durante o experimento, a temperatura era adquirida a cada 10s pelo sistema de aquisição de dados Agilent®34972A .

Utilizou-se 34 termopares do tipo T AWG30. Nas paredes do forno foram colocados três sensores na lateral esquerda, três na lateral direita, dois na tampa, três no fundo, cinco na base e sete no topo. Na amostra foram colocados dois no topo, um na base, um na lateral direita, um na lateral esquerda, um na face paralela ao fundo do forno e um na face paralela à tampa do forno. Além disso, distribuiu-se aleatoriamente quatro termopares soltos na cavidade para medir a temperatura do ar ambiente.

O experimento foi realizado em três diferentes temperaturas: 120⁰C que é a temperatura mais baixa possível de ser regulada para utilizar o forno em uma situação extrema; 300⁰ que é a temperatura mais alta possível de ser regulada; e 210⁰C que é uma temperatura intermediária. Houveram 5 repetições do experimento a cada temperatura em ordem aleatória gerada por um software, mostrado na tabela 4.1.

Após a realização dos experimentos fez-se um tratamento estatístico para a exibição dos

Tabela 4.1: Ordem dos experimentos geradas aleatoriamente.

Experimento	Temperatura $^{\circ}C$
1	120
2	300
3	300
4	120
5	210
6	300
7	210
8	120
9	300
10	210
11	120
12	210
13	300
14	120
15	210

resultados.

Uma diferença comparada com uma situação real é a ausência de umidade no processo, muito comum na maioria dos alimentos. Outra diferença é colocar a amostra dentro do forno antes de iniciar o aquecimento. Em uma situação real o usuário aquece o forno, abre a tampa e coloca o alimento para aquecer. O fato de abrir a tampa causa uma perturbação no meio pela entrada de ar frio (ou saída de ar quente) que influencia diretamente o estado térmico gerado no aquecimento do forno vazio. Logo, o experimento realizado neste trabalho favorece o funcionamento do forno e o equilíbrio térmico do processo por não ocorrer a perturbação do meio pela abertura da tampa do forno.

4.2 Descrição do forno

O equipamento é um forno elétrico *Brastemp*® (figura 4.1) modelo BOB61A com dimensões $50x50x50$ cm e temperatura reguláveis entre $120^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$. Possui duas fontes quentes (uma na base e outro no topo do forno), potência máxima de 1885W. As paredes do forno são consideradas como sendo de aço 1010 pintada na cor preta, logo sua emissividade é $\varepsilon = 0,98$ (BERGMAN et al., 2011).

Na figura 4.2 mostra-se a evolução das temperaturas com o forno setado em $210^{\circ}C$ ligado



Figura 4.1: Forno elétrico Brastemp®, modelo BOB61A carregado com o corpo de prova e com termopares.

durante $3h25min$.

4.3 Descrição da amostra (corpo de prova)

O corpo de prova (amostra) foi construído preenchendo-se um tabuleiro de alumínio médio de dimensões $35 \times 20 \times 4 \text{ cm}$, com concreto na proporção em volume 2x1 de areia e cimento (figura 4.3). Esta amostra mantém as condições geométricas de uma utilização comum de um forno.

As propriedades térmicas dos materiais da amostra podem ser encontrados em (BERGMAN et al., 2011). Forma de alumínio tem emissividade $\varepsilon_{al} = 0.69$ e o concreto tem emissividade $\varepsilon_{conc} = 0.88$

4.4 Métodos Estatísticos aplicados

A temperatura de cada face, tanto da amostra quanto do forno, foi considerada como sendo a média aritmética simples entre as temperaturas medidas em todos os termopares para aquela face em cada temperatura, decrito na equação 4.1. O processo foi aplicado para

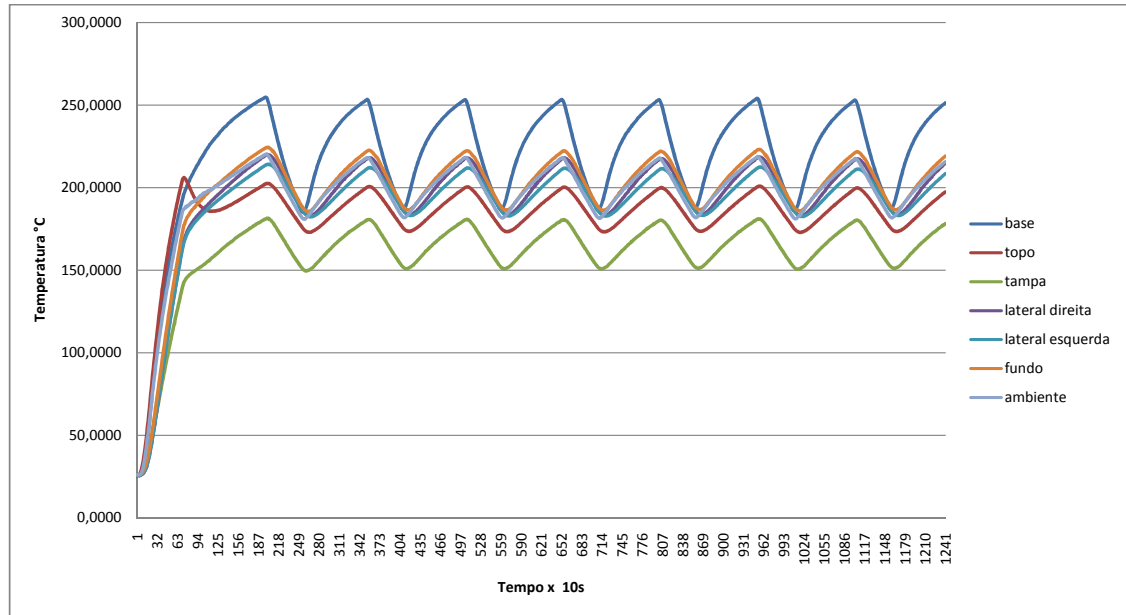


Figura 4.2: Temperaturas ambiente e nas paredes do forno para um experimento de $3h25min$ com o forno vazio.

cada intervalo de tempo.

$$T(t, face) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T(medida)_{ij}}{m \times n} \quad (4.1)$$

onde m é a repetição do experimento e n é o número de termopares na face avaliada.

Aplicou-se este processo em todas as temperaturas medidas. Assim, considerando o experimento seguindo uma distribuição normal $\sigma(0, 1)$ para um intervalo de confiança de 95%, tem-se a equação 4.2.

$$\bar{T}(t, face) = \bar{X} \pm Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.2)$$

onde n é o número de temperaturas adquiridas.



Figura 4.3: Corpo de prova montado com uma massa de concreto no interior de uma forma de alumínio.

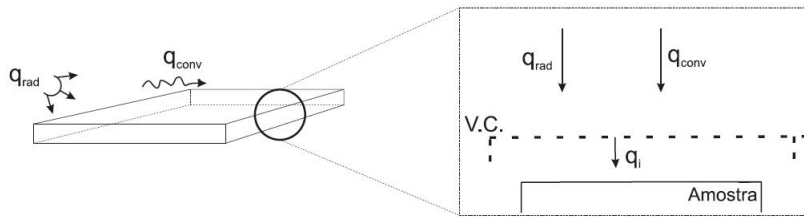


Figura 4.4: Balanço de energia no volume de controle

A tabela 4.2 apresenta um exemplo da aplicação do método para um tempo de experimento típico.

Tabela 4.2: Temperaturas medidas no topo do forno para o tempo de 1500 segundos nos experimentos setados em $210^{\circ}C$.

Experimento-face	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3	Termopar 4	Termopar 5
1-base forno	153,2	159,3	163,7	147,1	149,8
2-base forno	144,3	144,1	154,4	133,1	144,4
3-base forno	151,2	150,7	161,4	138,5	149,5
4-base forno	171,9	171,8	182,4	155,7	161,5
5-base forno	161,2	161,3	172,4	146,3	155,5

Aplicando-se a equação 4.1 e 4.2 tem-se, com 95% de confiança, que a temperatura da superfície da base do forno no tempo $t = 1500s$ é $T(1500, base\ forno) = 159,1^{\circ} \pm 4,43^{\circ}C$

(2, 786%).

Aplicando-se o método para as temperaturas em todas as superfícies, obteve-se com 95% de confiança, uma variação máxima de $\pm 18,80\%$ para o tempo 260s na face da base do forno no experimento setado em $210^{\circ}C$. Em todos os experimentos ocorre um grande desvio padrão na face da base em tempos próximos de 260s, isto porque o termopar que está no centro aquece-se consideravelmente mais rápido que os demais, aumentando o desvio padrão na temperatura desta face no início do aquecimento. Isto ocorre em todos os experimentos e no tempo de 260s tem-se uma variação de $\pm 18,72\%$ quando setado em $120^{\circ}C$ e $\pm 18,33\%$ quando setado em $300^{\circ}C$. Após o período inicial do aquecimento, a variação diminui em torno de 5% para todas as temperaturas em todas as faces. Toda as medidas realizadas e as análises estatísticas são encontradas em um relatório específico (MALHEIROS, 2013).

Os resultados das temperaturas nas paredes do forno, no ar e nas paredes do corpo de prova são apresentados a seguir.

4.5 Temperaturas medidas nos experimentos

As superfícies do forno foram nomeadas como mostrado na figura 4.5:

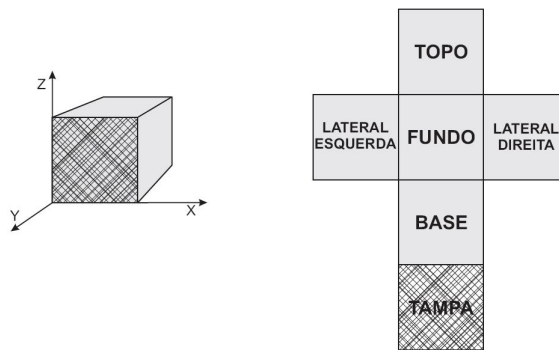


Figura 4.5: Descrição dos nomes das paredes do forno

As superfícies do corpo de prova tem o nome da superfície do forno ao qual ela está paralela, ilustrado na figura 4.6

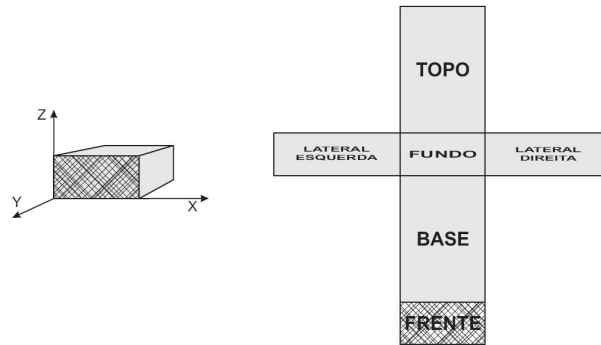


Figura 4.6: Descrição dos nomes das paredes do corpo de prova

4.5.1 Temperaturas medidas no ar e nas paredes do forno

- Temperatura na base do forno.

Observa-se na figura 4.7 que estas temperaturas são as mais altas do experimento dado que a resistência está diretamente em contato com esta superfície. Outro ponto relevante é a repetibilidade da curva de aquecimento desta superfície. Esta repetibilidade faz com que os experimentos setados em $120^{\circ}C$ tenham grande oscilação de temperatura, mostrando, em alguns momentos temperatura de $67^{\circ}C$, o que é 55% inferior à temperatura setada, isto depois do forno já aquecido.

No experimento setado em $300^{\circ}C$ a temperatura da base, que é a superfície mais próxima da fonte quente, não atinge esta temperatura em nenhum momento do experimento que durou 4410s (1h13min30s). Observa-se ainda, na figura 4.7 que a base não atingirá a temperatura setada.

- Temperatura no topo do forno.

No topo do forno encontra-se uma resistência (grill) que, segundo instruções do fabricante deve ser ligado durante o período de aquecimento (10 a 15 min) do forno. Observa-se na figura 4.8 a repetibilidade da curva de aquecimento para todos os gráficos apresentados, e, também, variações da temperatura para o experimento a $120^{\circ}C$. Observa-se, também, que em nenhum experimento a temperatura desta superfície ultrapassou a marca de $200^{\circ}C$ após o período de aquecimento, nem mesmo quando setado em $300^{\circ}C$.

- Temperatura do ar no interior da cavidade do forno.

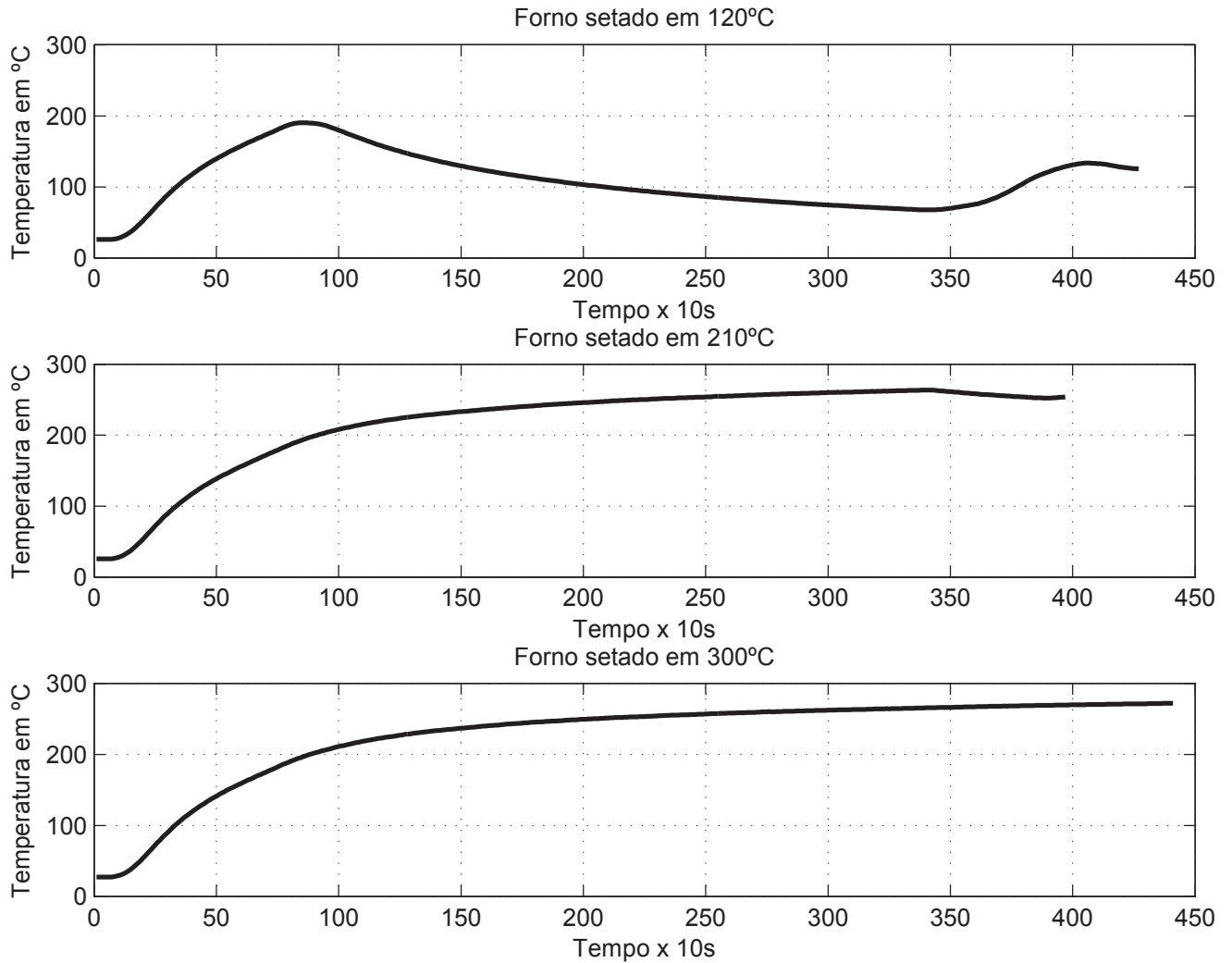


Figura 4.7: Temperatura da base do forno para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$.

Na figura 4.9 observa-se que a temperatura se mantém próxima à setada somente para o experimento de $210^{\circ}C$. Além disso, no experimento de $120^{\circ}C$ a temperatura do ar é a que sofre a menor queda (exceto quando comparado com a base e o topo que atingem temperaturas mais elevadas no aquecimento devido a posição das fontes quentes), isto porque o controle da temperatura no forno é feito por um termostato posicionado no fundo mais a esquerda do forno. Para o experimento de $300^{\circ}C$ o ar ambiente não atingiu temperaturas maiores que $223^{\circ}C$, logo, a resistência da base do forno não desligou em nenhum momento para este experimento.

- Temperatura na lateral direita do forno.

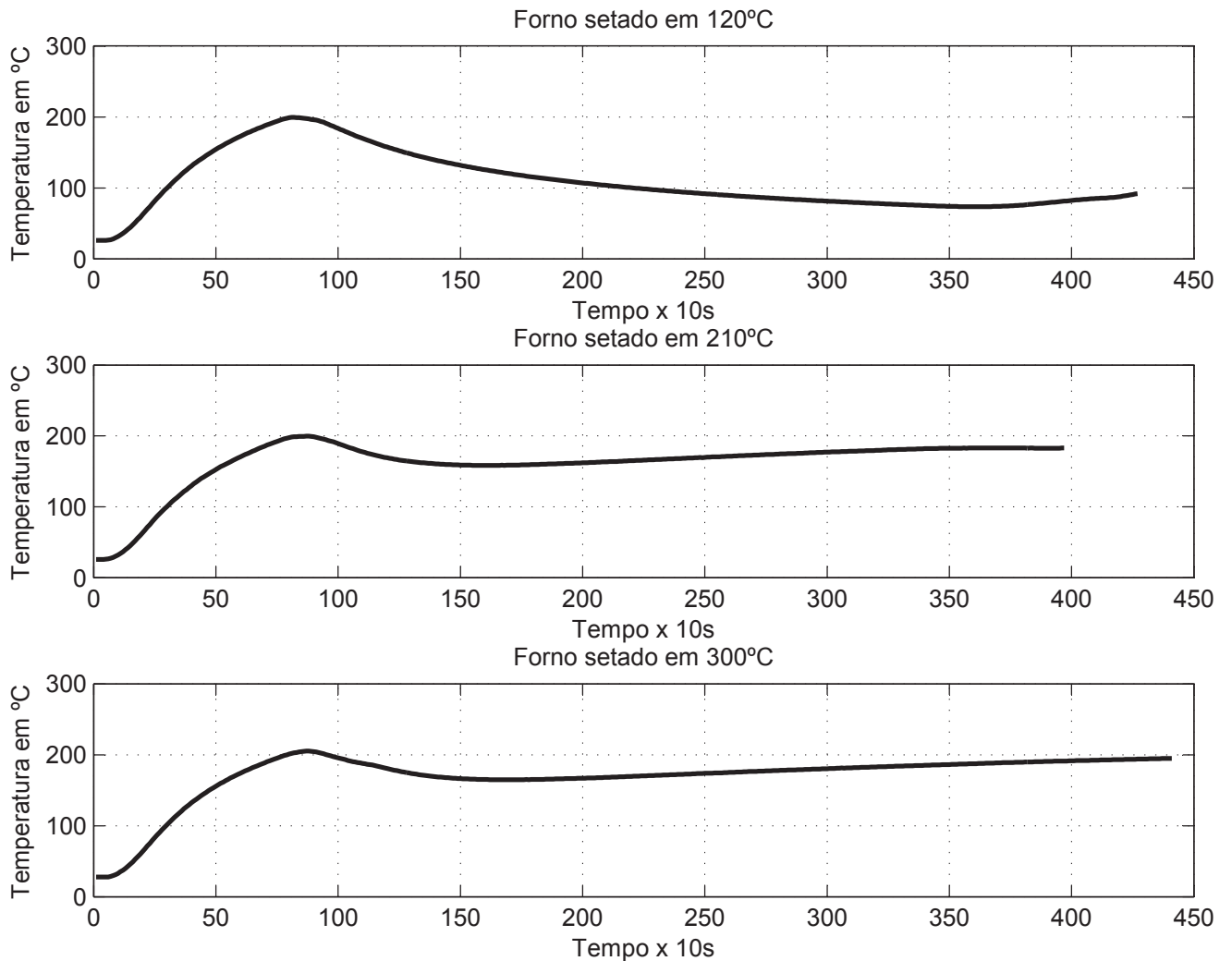


Figura 4.8: Temperatura do topo do forno para o experimento setado em 120°C , 210°C e 300°C .

Observa-se na figura 4.10 que a lateral direita do forno tem comportamento muito similar à temperatura ambiente mostrando apenas temperaturas ligeiramente mais baixas no ponto de mínimo do experimento setado em 120°C e temperaturas mais altas nos experimentos setados em 210°C e 300°C .

- Temperatura na lateral esquerda do forno.

Observa-se na figura 4.11 que a lateral esquerda do forno tem o mesmo comportamento da lateral direita, mostrando a qualidade da distribuição de calor no forno. Porém, vale ressaltar que a temperatura do experimento de 120°C tem variações em torno da temperatura setada e que em nenhum momento a temperatura setada é atingida para o experimento de 300°C .

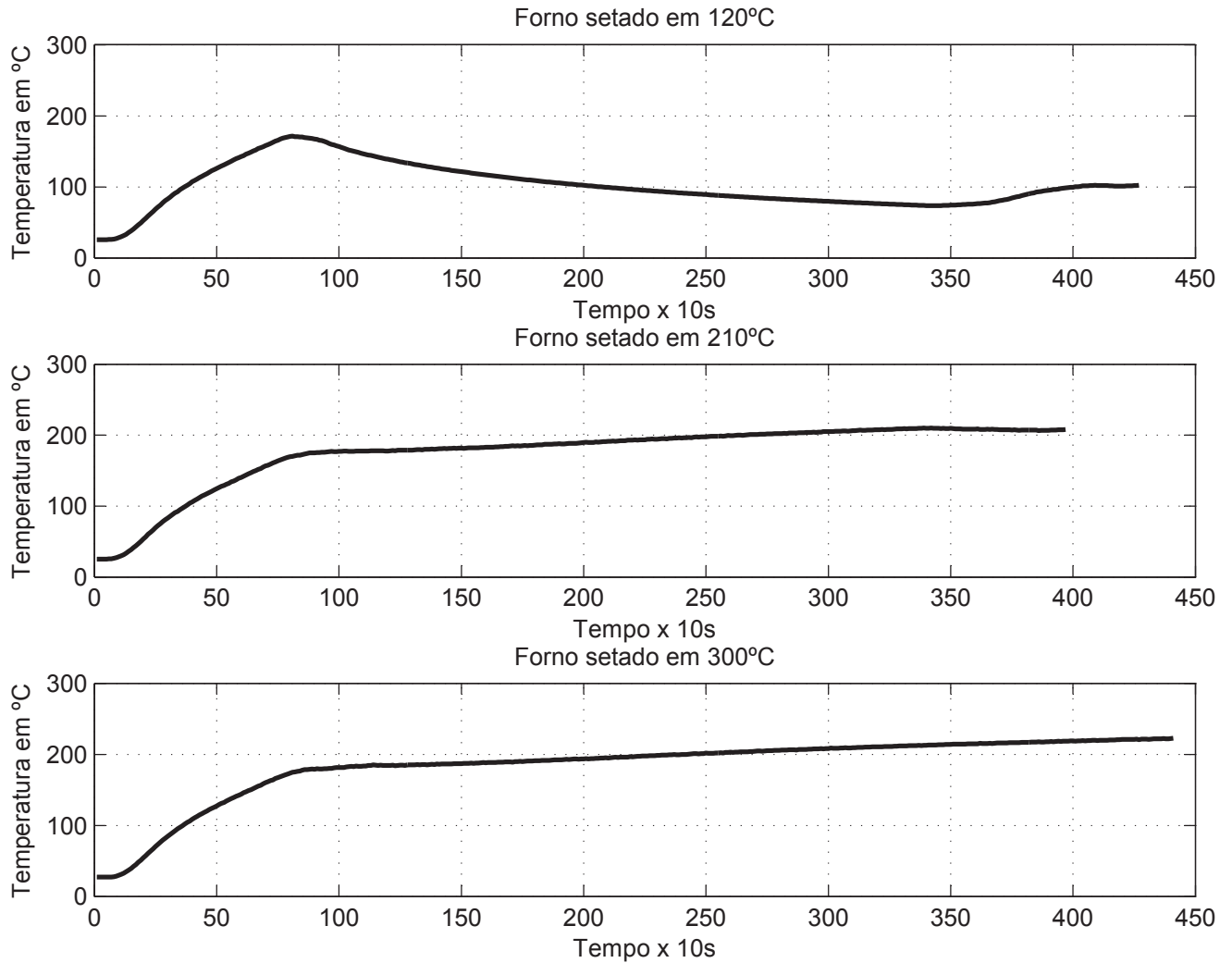


Figura 4.9: Temperatura do ar no interior da cavidade do forno para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$.

- Temperatura na tampa do forno.

Na figura 4.12 observa-se que a superfície tem comportamento térmico semelhante ao ar no interior do forno, porém em uma grandeza visivelmente menor. Isto porque a tampa do forno é feita de vidro e não tem camadas de isolante como nas demais superfícies, fazendo com que o forno perca calor para o ambiente.

- Temperatura no fundo do forno.

A figura 4.13 apresenta o comportamento térmico do fundo do forno. Observa-se nesta figura que o comportamento do fundo é semelhante ao do ar ambiente, diferenciando-se apenas nos

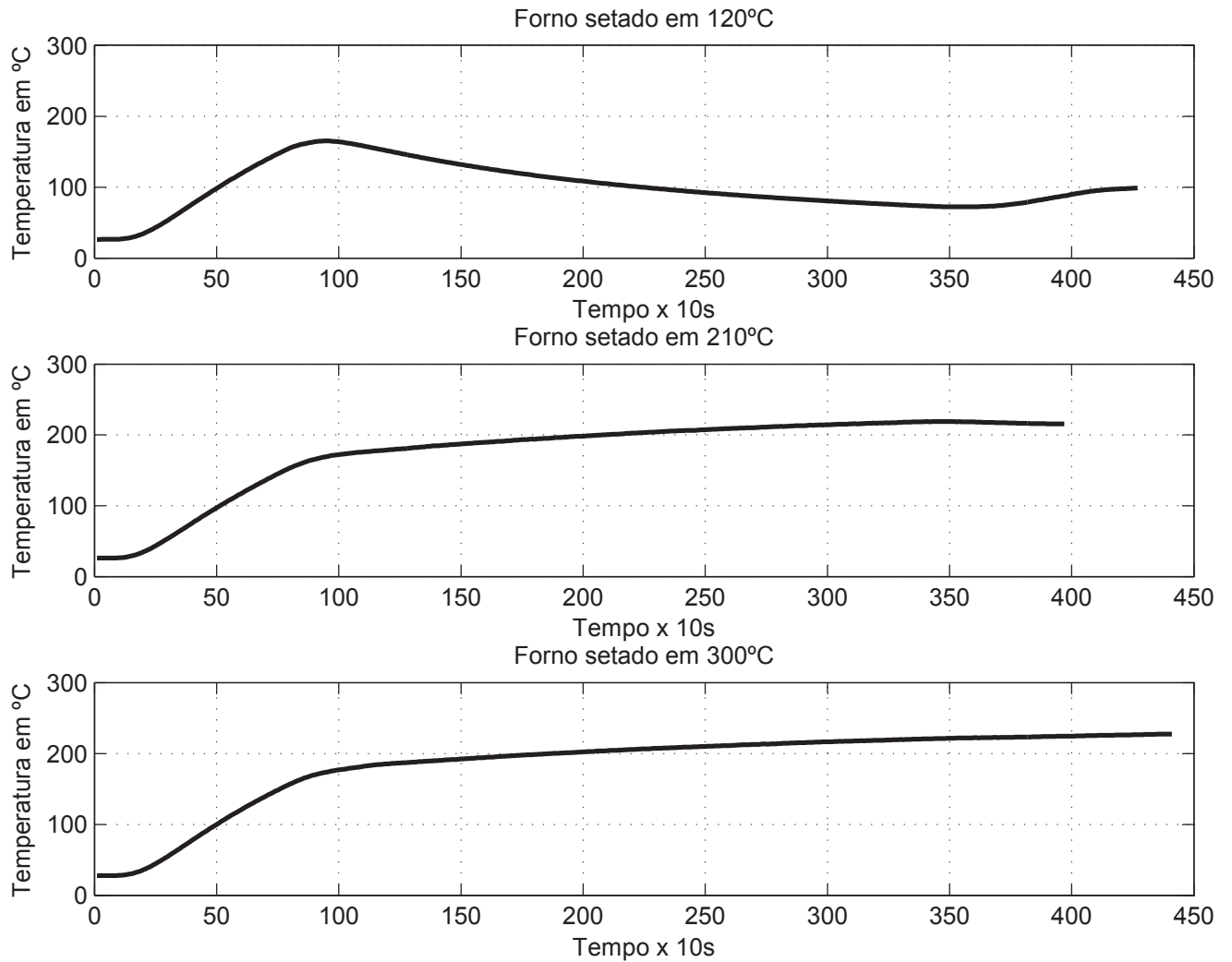


Figura 4.10: Temperatura da lateral direita do forno para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$.

experimentos setados em $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$ quando o fundo apresenta temperaturas ligeiramente maiores. No experimento setado em $120^{\circ}C$ o comportamento do fundo diferencia-se do comportamento do ar por apresentar temperaturas mínimas mais baixas.

4.5.2 Temperaturas medidas nas superfícies do corpo de prova

Observa-se na figuras 4.14 a 4.19 apresentadas nesta seção que as curvas de temperaturas tem comportamento semelhante para todas as faces do corpo de prova, porém, nenhuma face do corpo de prova atingiu a temperatura setada no forno para nenhum dos experimentos. Outro ponto observado é que mesmo a tampa do forno tendo as temperaturas mais baixas

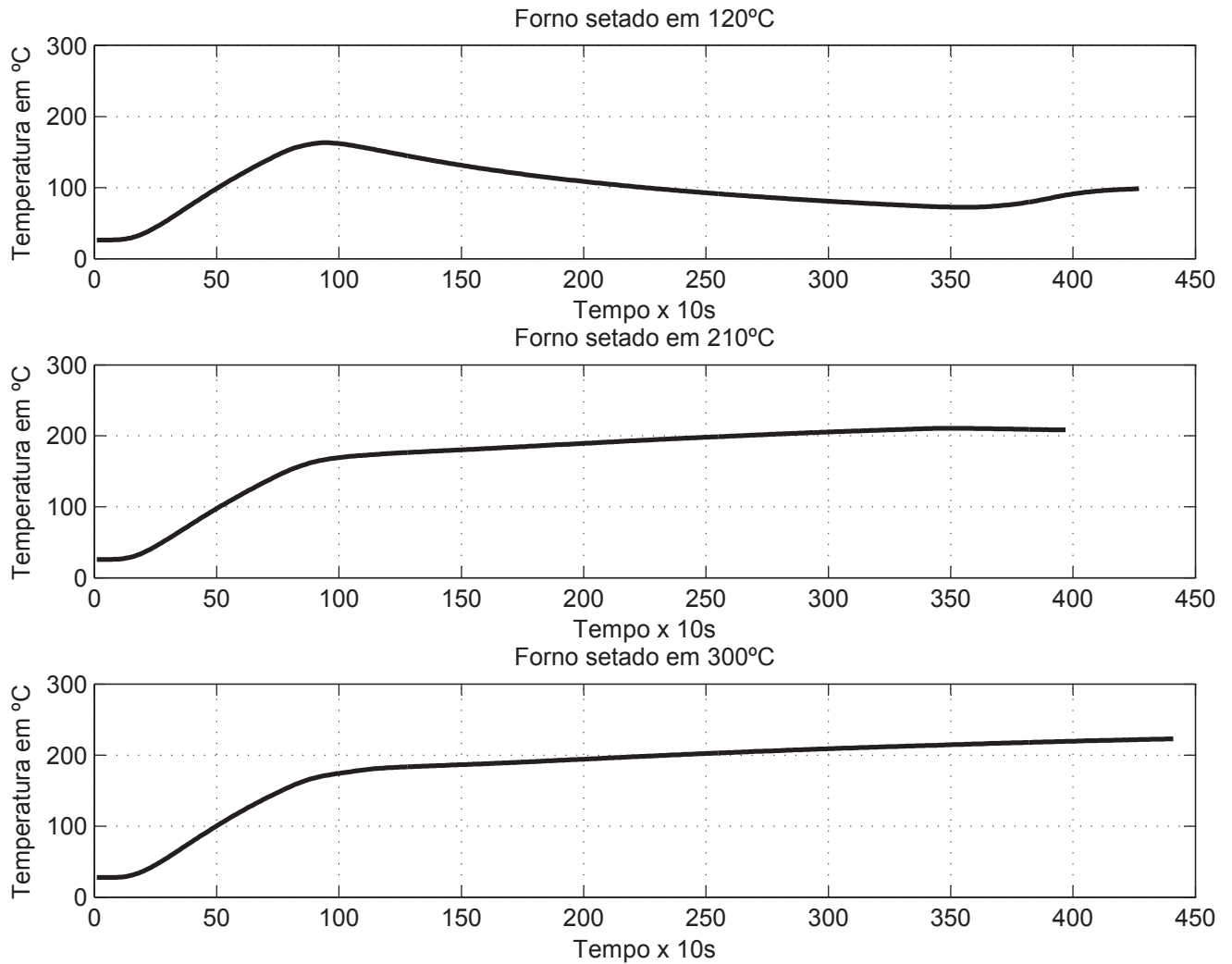


Figura 4.11: Temperatura da lateral esquerda do forno para o experimento setado em 120°C , 210°C e 300°C .

medidas, a face do corpo de prova paralela a ela (a frente) tem uma curva de aquecimento similar às demais superfícies, exceto ao topo do corpo de prova. Isto porque a forma de alumínio é um bom condutor de calor e o distribui ao redor de sua superfície. Na prática, a parte do alimento que está em contato com a forma assa mais que as demais partes do alimento. Nota-se ainda que a resistência superior (grill) exerce influência direta na temperatura do topo do corpo de prova.

- Temperatura na base do corpo de prova.

Observa-se (Figura 4.14) que para a experimento de 120°C a curva de aquecimento é um estado de quase regime com a temperatura ao redor de 90°C . Os experimentos de 210°C

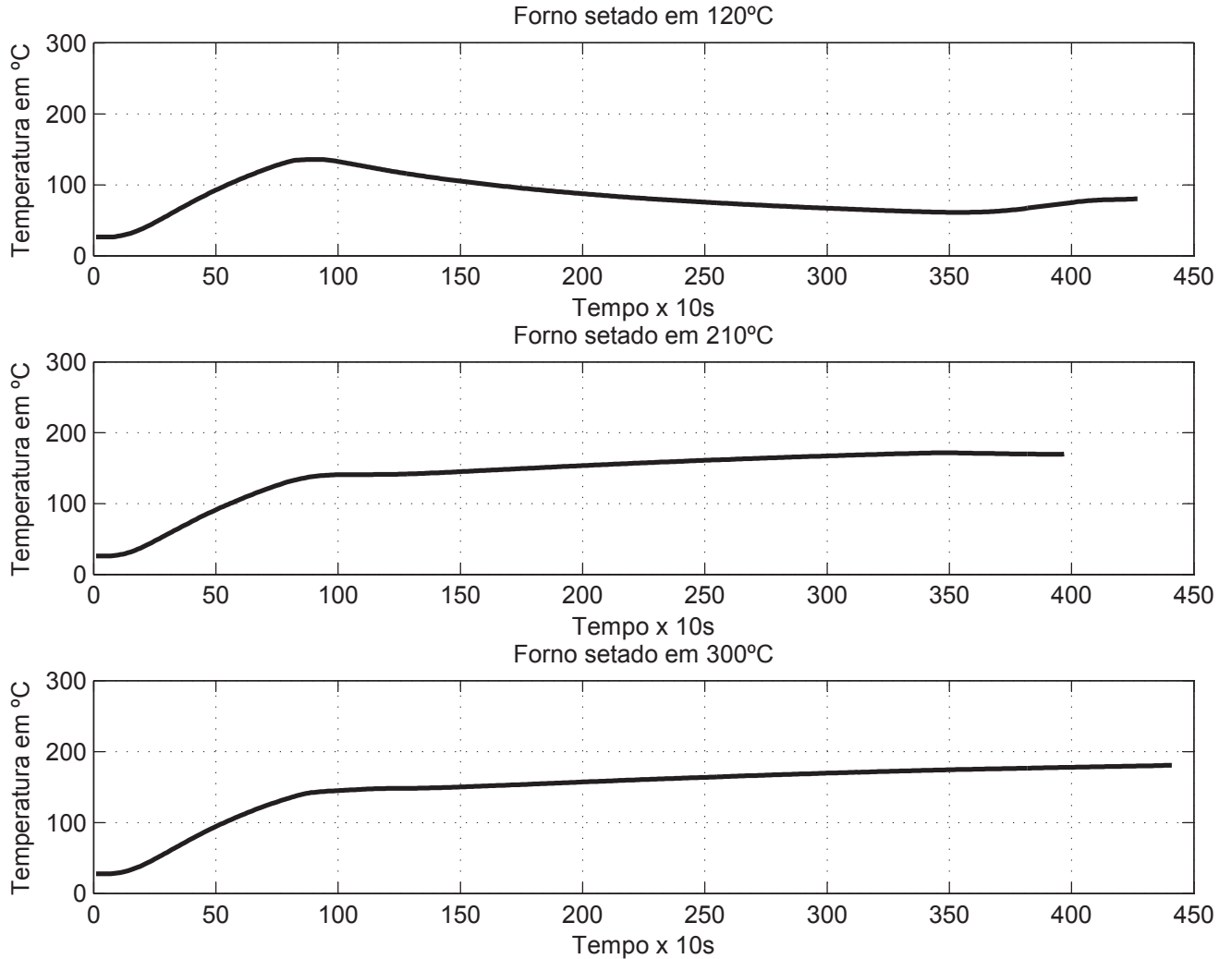


Figura 4.12: Temperatura na tampa do forno para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$.

e $300^{\circ}C$ tem comportamento semelhante com temperaturas ligeiramente maiores no experimento de $300^{\circ}C$.

- Temperatura na topo do corpo de prova.

Observa-se que para todos os experimentos (figuras 4.14 a 4.19) há um pico logo após a curva de aquecimento evidenciando o momento em que a resistência do topo foi desligada e a influência direta da radiação no aquecimento da face. Isto é evidenciando, também, pelo fato de a curva de aquecimento desta superfície (Figura 4.15) ser ligeiramente mais acentuada que nas demais superfícies do corpo de prova.

- Temperatura na lateral direita do corpo de prova.

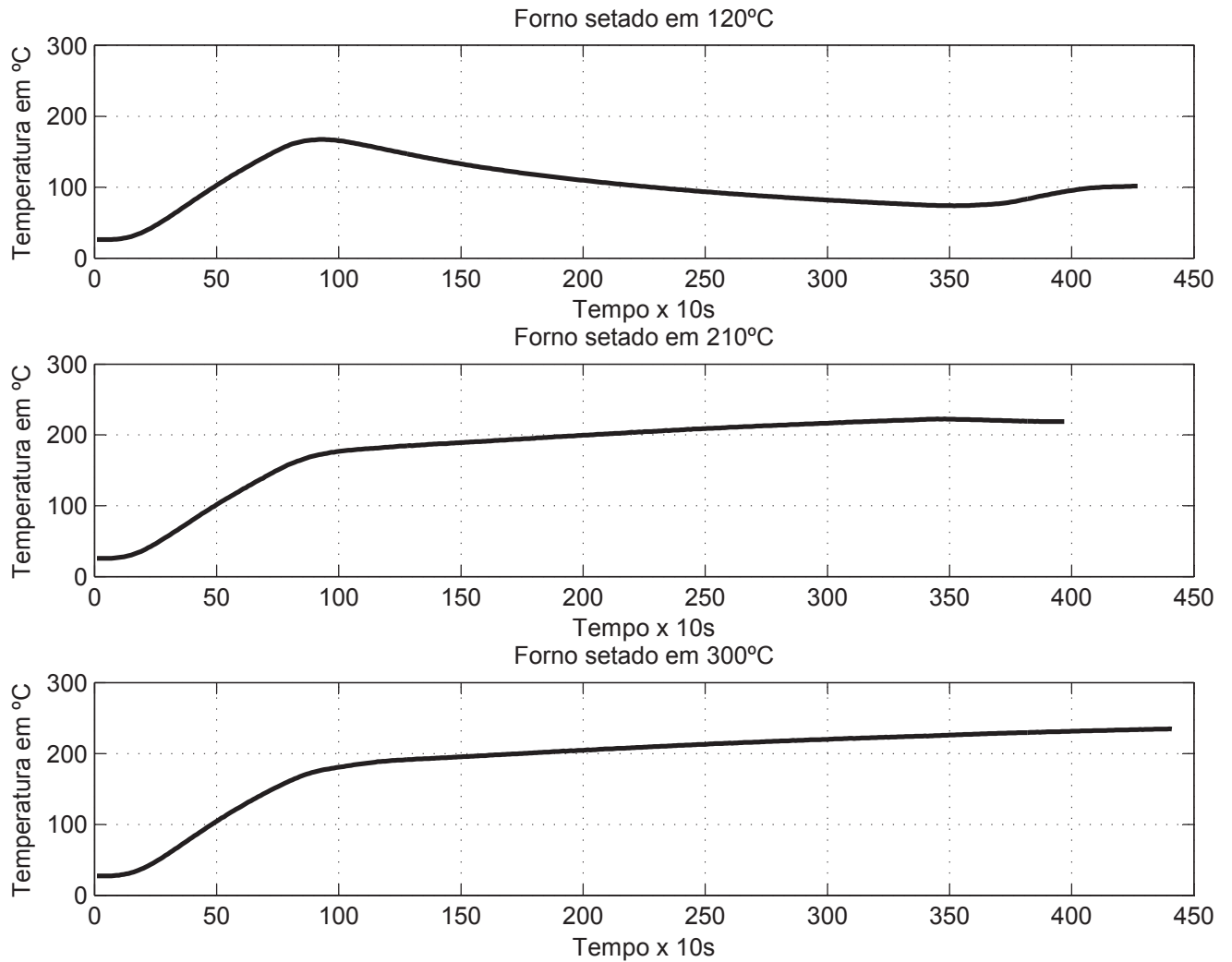


Figura 4.13: Temperatura no fundo do forno para o experimento setado em 120°C , 210°C e 300°C .

Da Figura 4.16 observa-se que esta superfície tem comportamento semelhante ao da superfície da base do corpo de prova.

- Temperatura na lateral esquerda do corpo de prova.

Na Figura 4.17 observa-se que a curva de aquecimento tem comportamento semelhante ao da lateral direita e da base do corpo de prova.

- Temperatura na frente do corpo de prova.

Na Figura 4.18 observa-se que apesar da temperatura da tampa do forno ter as temperaturas mais baixas, o comportamento da curva de temperatura para esta superfície se assemelha

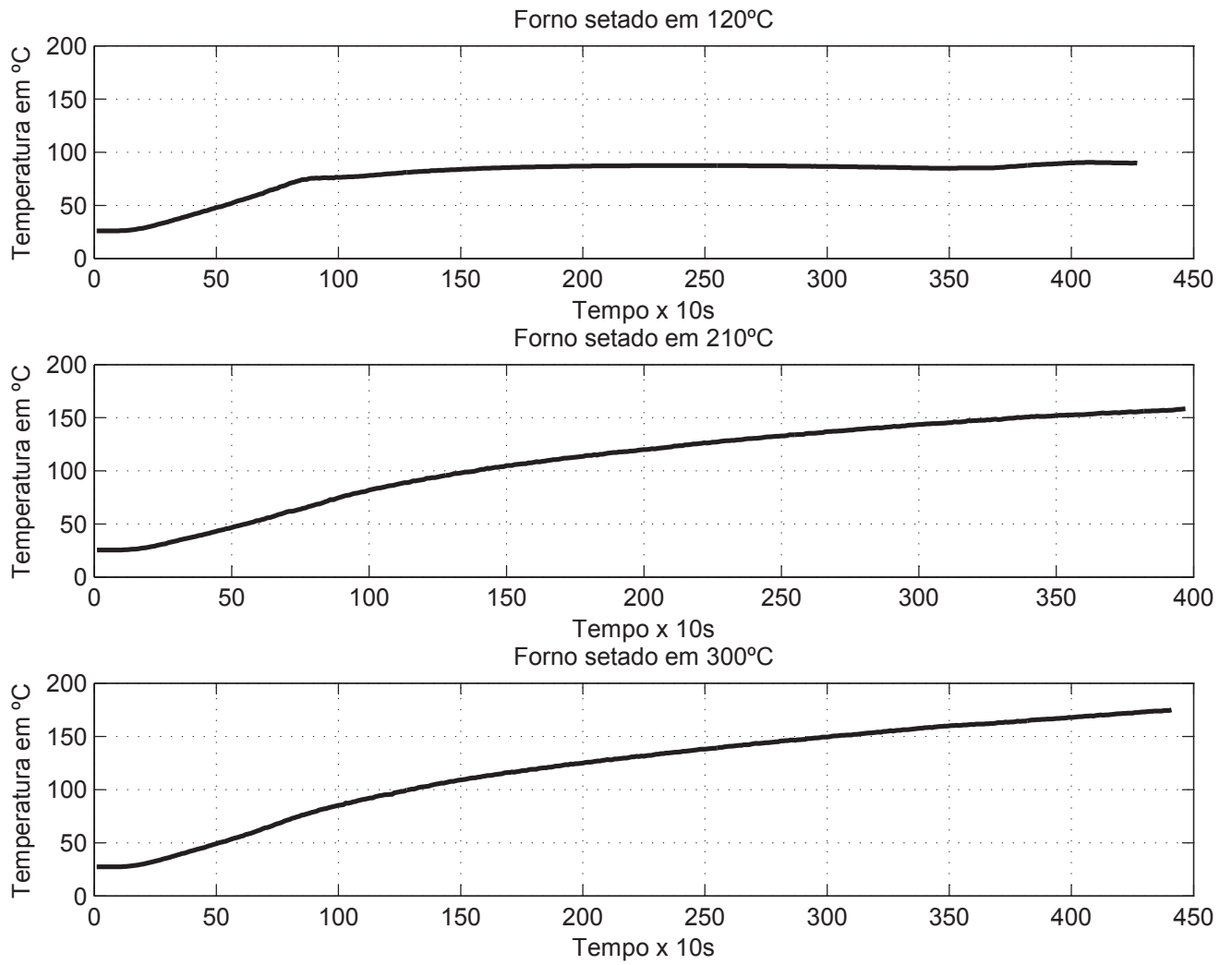


Figura 4.14: Temperatura da base do corpo de prova para o experimento setado em 120°C, 210°C e 300°C.

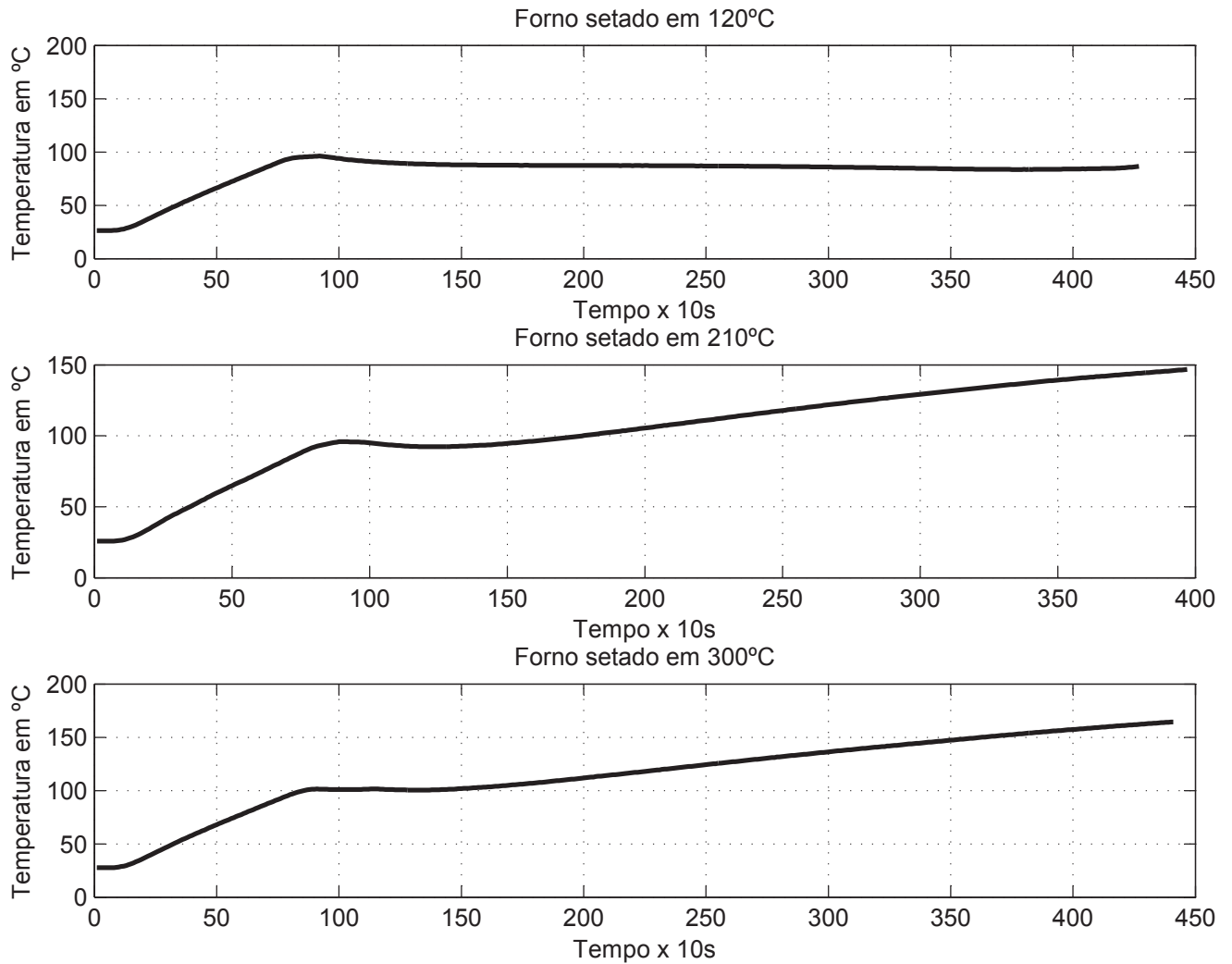


Figura 4.15: Temperatura do topo do corpo de prova para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$.

ao comportamento das superfícies da base, lateral direita, lateral esquerda e fundo do corpo de prova. Isto porque, a forma (tabuleiro) é de alumínio e distribui o calor ao longo de sua superfície. Uma visão prática disto é que a superfície do alimento em contato com a forma assa mais que as demais partes.

- Temperatura na fundo do corpo de prova.

O fundo do corpo de prova tem comportamento semelhante às demais superfícies formadas pelo tabuleiro (base, lateral esquerda, lateral direita e frente do corpo de prova). Este comportamento é observado na Figura 4.19.

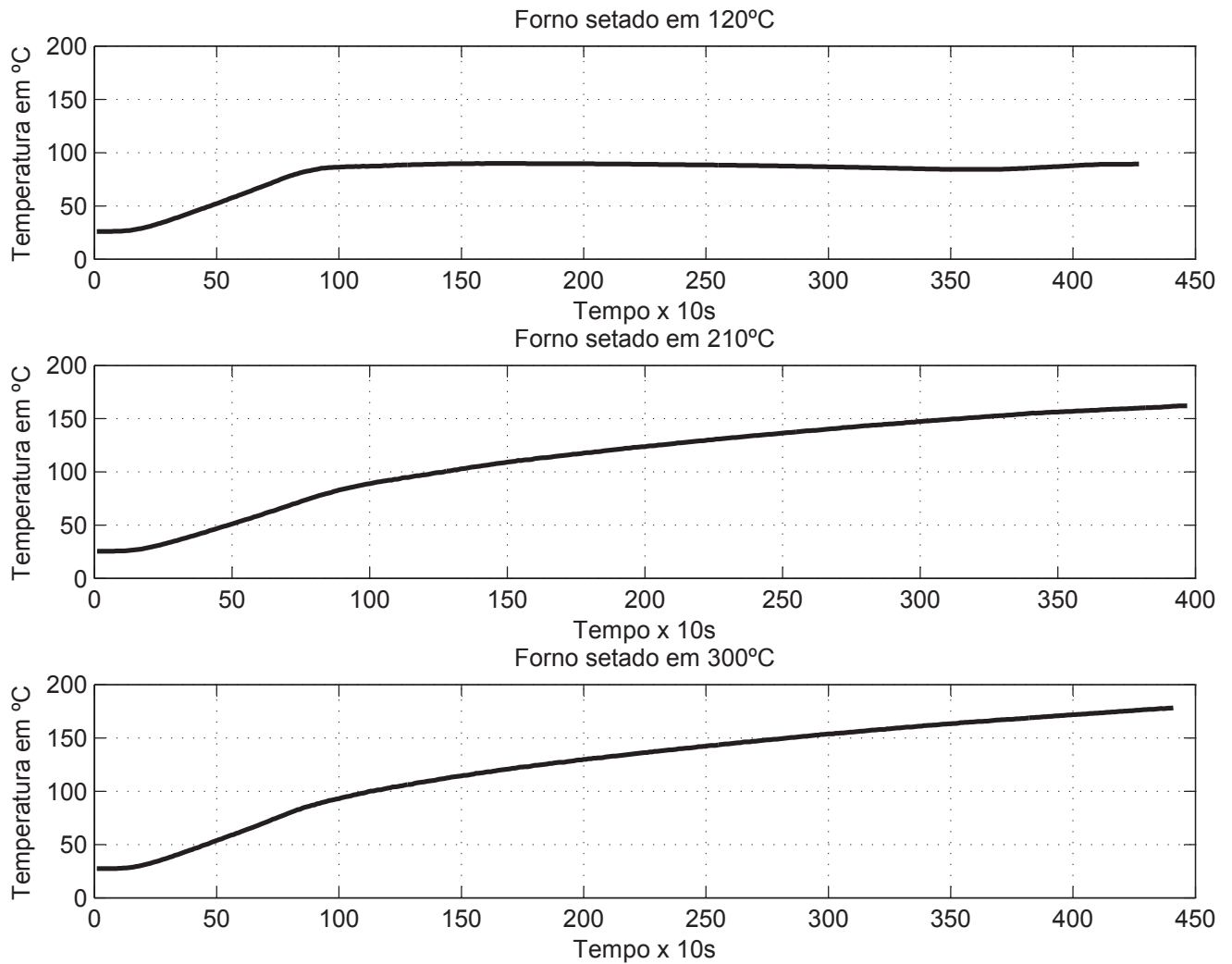


Figura 4.16: Temperatura da lateral direita do corpo de prova para o experimento setado em 120°C , 210°C e 300°C .

4.6 Calibração dos termopares

A calibração foi feita para quatro termopares. Como houve repetição dos resultados e todos os termopares são da mesma bobina de fios, considerou-se que esta calibração é válida para todos os 34 usados no experimento. A calibração foi feita usando-se a bancada apresentada na figura 4.20.

Segundo o fabricante da célula de aquecimento (Hot Point Cel) com temperatura controlada a mesma entra em regime permanente 15min após setar-se a temperatura do experimento. Nesta calibração, a célula era setada e após, no mínimo, 60min adquiria-se 20

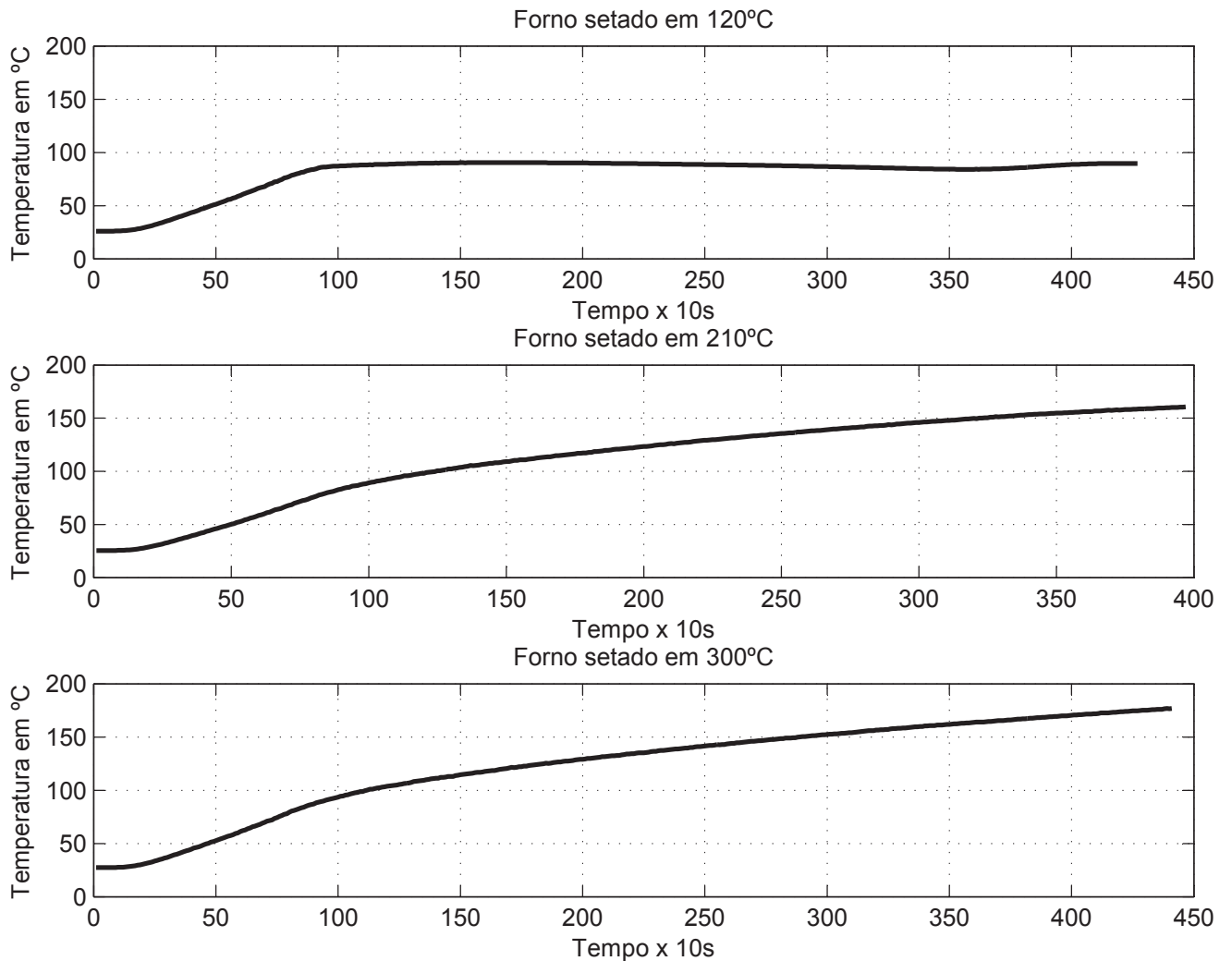


Figura 4.17: Temperatura na lateral esquerda do corpo de prova para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$.

temperaturas com o intervalo de tempo de 1s. O procedimento se repetiu para cada termopar em cada temperatura.

O termômetro padrão de referência tem resolução de $0,01^{\circ}C$ e registrou-se a temperatura dos termopares pelo sistema de aquisição de dados Agilent 34972A. As medições foram feitas para as temperaturas de $19^{\circ}C$, $20^{\circ}C$, $40^{\circ}C$, $50^{\circ}C$, $55^{\circ}C$, $75^{\circ}C$, $80^{\circ}C$, $95^{\circ}C$, $100^{\circ}C$, $120^{\circ}C$, $145^{\circ}C$, $150^{\circ}C$, $160^{\circ}C$, $195^{\circ}C$, $200^{\circ}C$, $240^{\circ}C$, $245^{\circ}C$, $250^{\circ}C$, $280^{\circ}C$ e $290^{\circ}C$.

As Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 apresentam as curvas de calibração para cada termopar.

Observa-se que a mesma curva de calibração foi obtida para os quatro termopares,

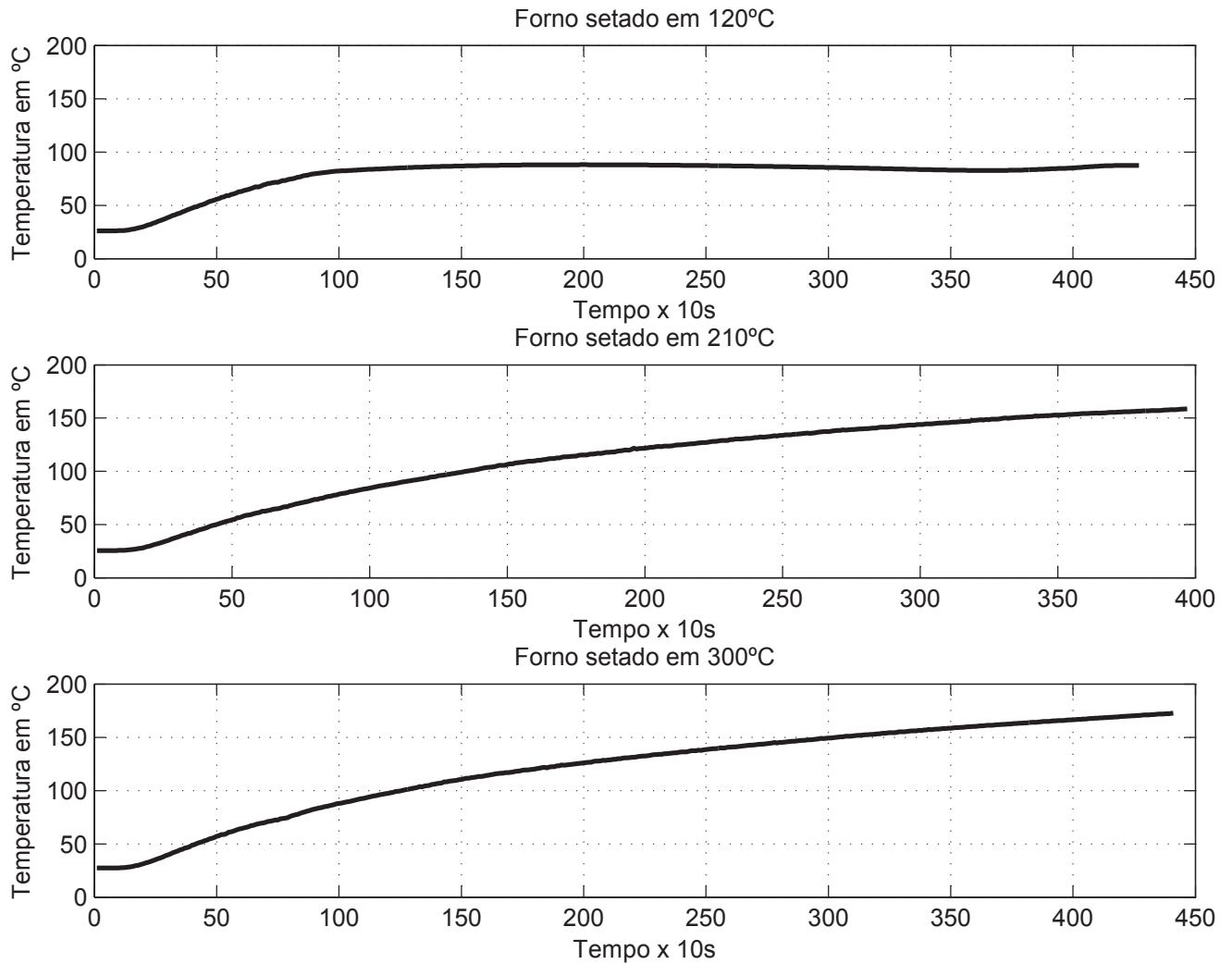


Figura 4.18: Temperatura na face da frente do corpo de prova para o experimento setado em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$.

obtendo-se $\theta_e = 0.9963\theta_m + 0.8099$. Este resultado assegura a hipótese de que o comportamento de todos os 34 termopares seja idênticos e portanto a mesma curva de calibração possa ser usada.

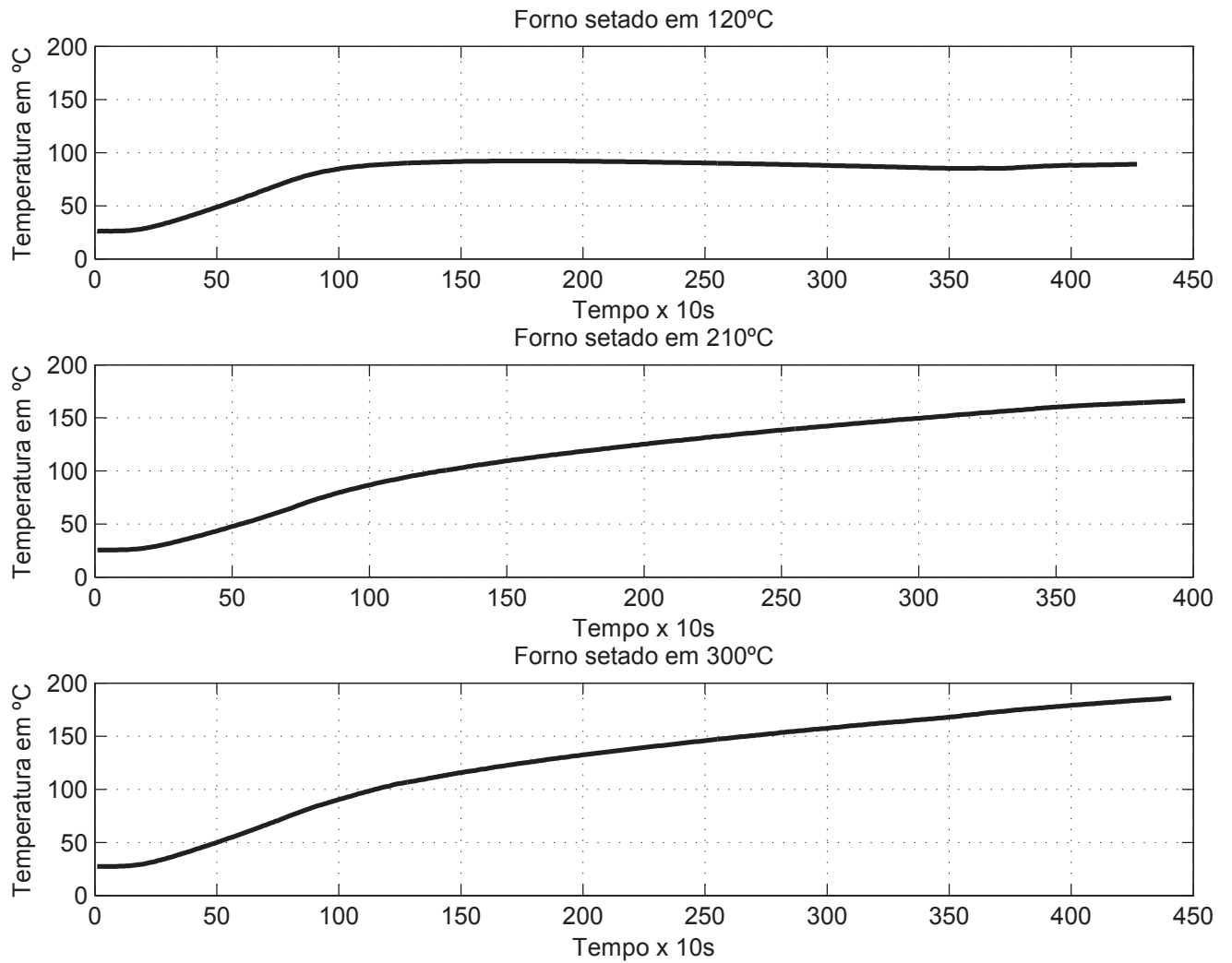


Figura 4.19: Temperatura do fundo do corpo de prova para o experimento setado em 120°C , 210°C e 300°C .

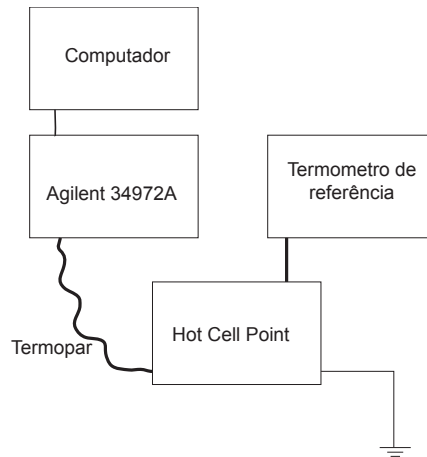


Figura 4.20: Esboço da bancada experimento de calibração dos termopares

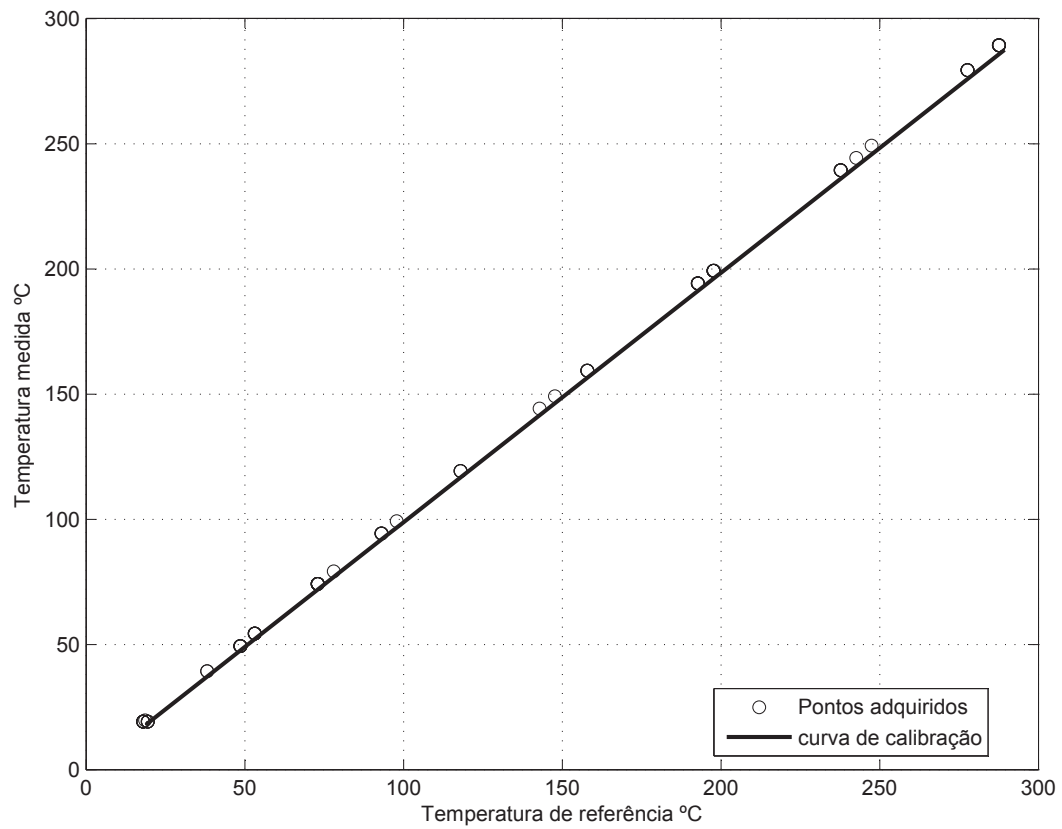


Figura 4.21: Curva de calibração para o termopar 1. (0.9963×-0.8099 e $R = 99.474\%$)

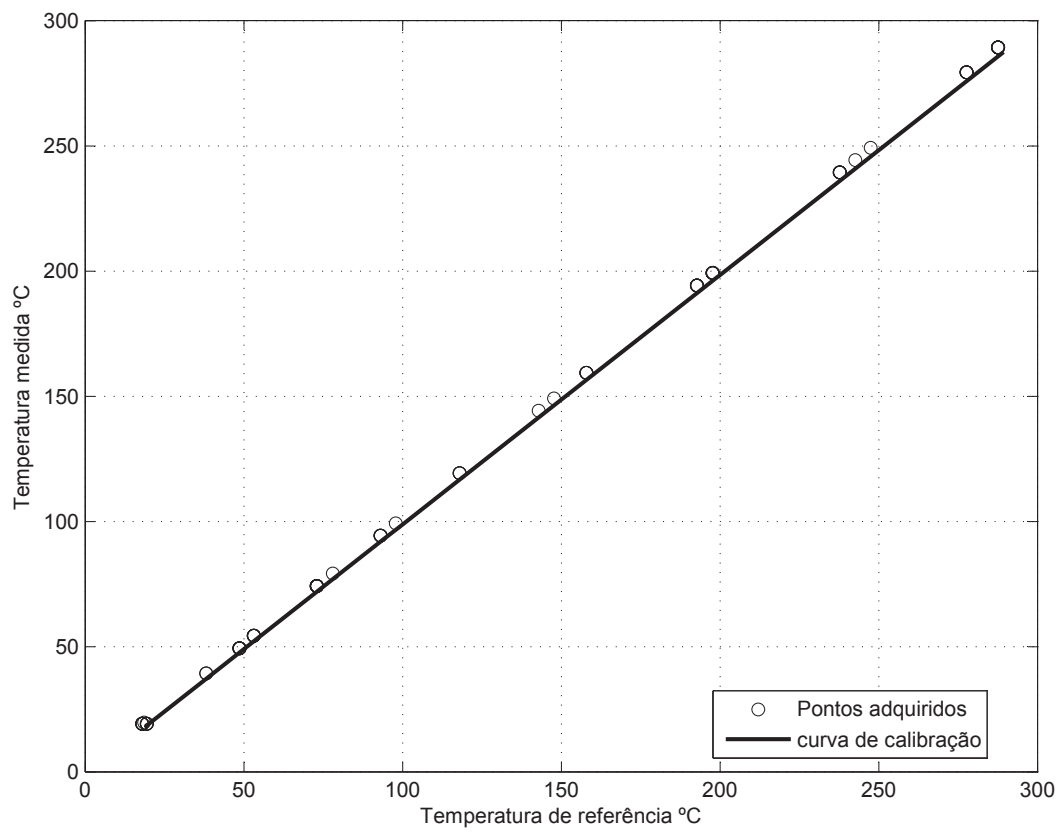


Figura 4.22: Curva de calibração para o termopar 2. (0.9963×-0.8099 e $R = 99.1935\%$)

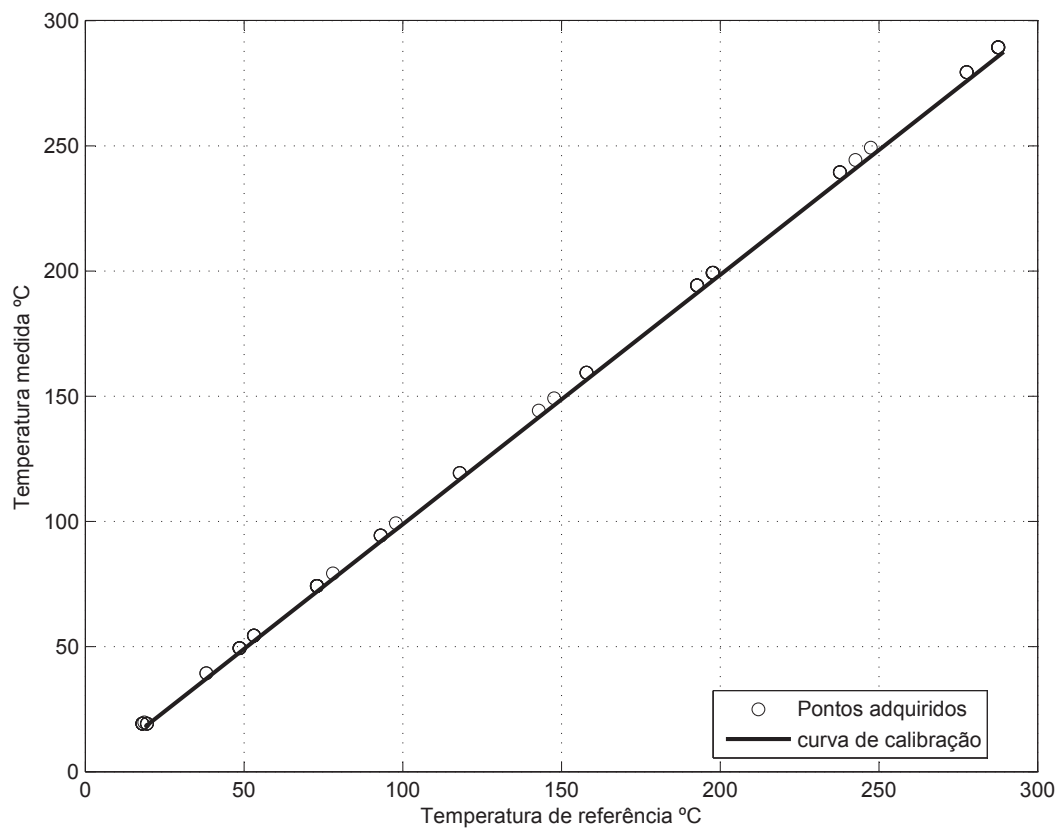


Figura 4.23: Curva de calibração para o termopar 3. (0.9963×-0.8099 e $R = 99.1095\%$)

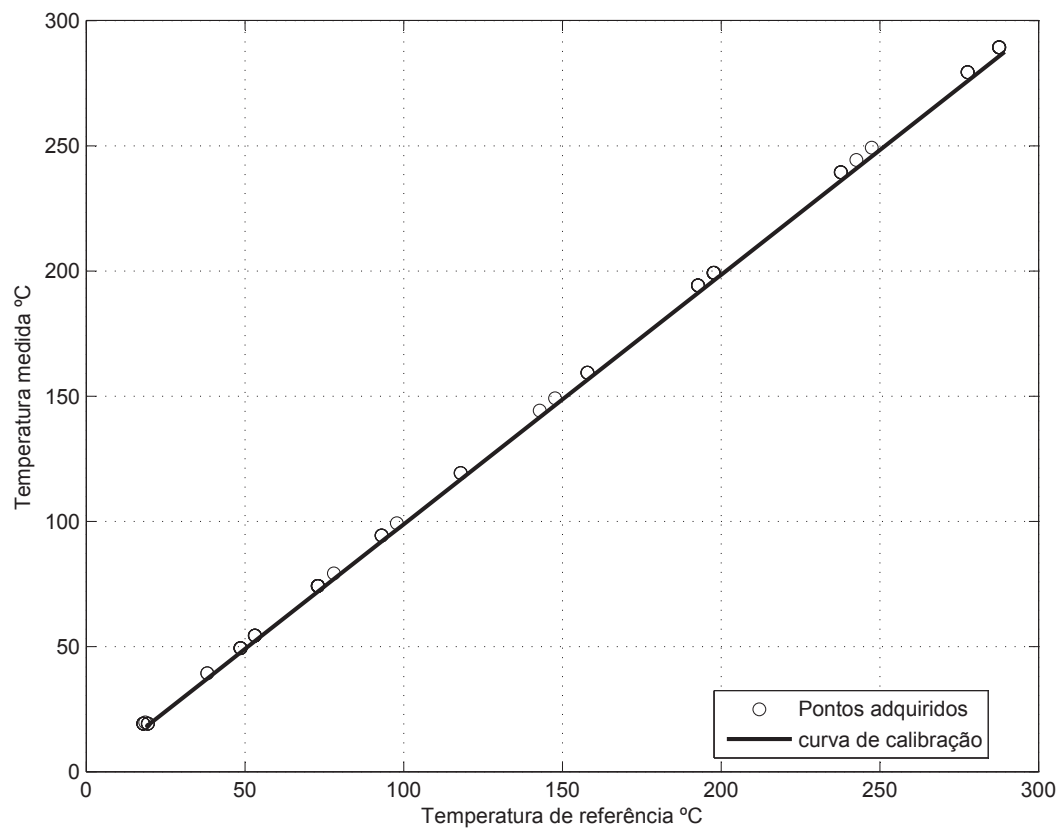


Figura 4.24: Curva de calibração para o termopar 4. (0.9963×-0.8099 e $R = 99.4901\%$)

Capítulo 5

Análise dos fluxos de calor por radiação e convecção térmica em uma amostra no interior de um forno

Os resultados foram baseados no parâmetros descritos nas seções 4.2 e 4.3. As faces do forno e do corpo de prova são nomeados como na secção 4.5 e rerepresentados no esquema mostrado na figura 5.1.

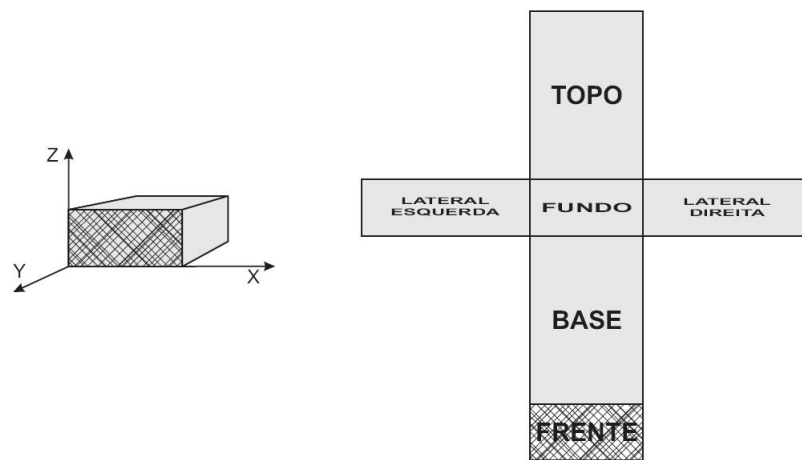


Figura 5.1: Nomenclatura usada nas superfícies da amostra.

5.1 Fluxos de calor encontrados

Os fluxos são mostrados nas Figuras (5.2 a 5.7) em cada face do corpo de prova separados em fluxo por radiação, fluxo por convecção e fluxo total que é a soma da radiação e convecção. Observa-se que em todas as faces o fluxo de radiação tem valores em módulo maior que o fluxo de convecção em todos os experimentos. O fluxo por convecção cresce, depois de um tempo diminui e tende a zerar pois o ar aquece mais rápido que a amostra e após algum tempo o gradiente de temperatura entre o ar e a superfície da amostra tende a diminuir. Nota-se, também, que o fluxo de convecção é praticamente o mesmo para as laterais, frente e fundo do corpo de prova, uma vez que o tabuleiro é um bom condutor de calor e homogeneiza a temperatura em sua superfície, causando um gradiente de temperatura constante com o ar para estas superfícies.

- Fluxos de calor na base do corpo de prova

Observa-se na figura 5.2 que o fluxo por radiação é mais intenso do que a convecção, ficando negativo por um período do experimento a $120^{\circ}C$ quando a temperatura da base do forno fica menor que a temperatura da base da amostra. O mesmo não acontece com o fluxo por convecção uma vez que a temperatura do ar é a que sofre o menor decaimento no experimento de $120^{\circ}C$.

O fluxo por radiação é da ordem de 10 vezes maior que nas demais superfícies, exceto o topo, onde o tamanho da área e as temperaturas na base do corpo de prova são as maiores registradas nos experimentos pela proximidade com a fonte quente.

- Fluxos de calor no topo do corpo de prova

Observa-se na Figura 5.3 que a grandeza do fluxo de radiação é da ordem de 10 vezes maior que o fluxo nas outras superfícies, exceto para a base, devido a maior área desta superfície. Apesar da grandeza da radiação, ela é menor que na base do forno, uma vez que esta face não tem uma fonte quente ligada permanentemente fazendo com que a convecção tenha maior participação no processo de aquecimento comparado com a base. Isto pode ser observado pelo distanciamento do fluxo de radiação e do fluxo total no gráfico 5.3 principalmente para os experimentos de $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$.

- Fluxos de calor na lateral direita do corpo de prova

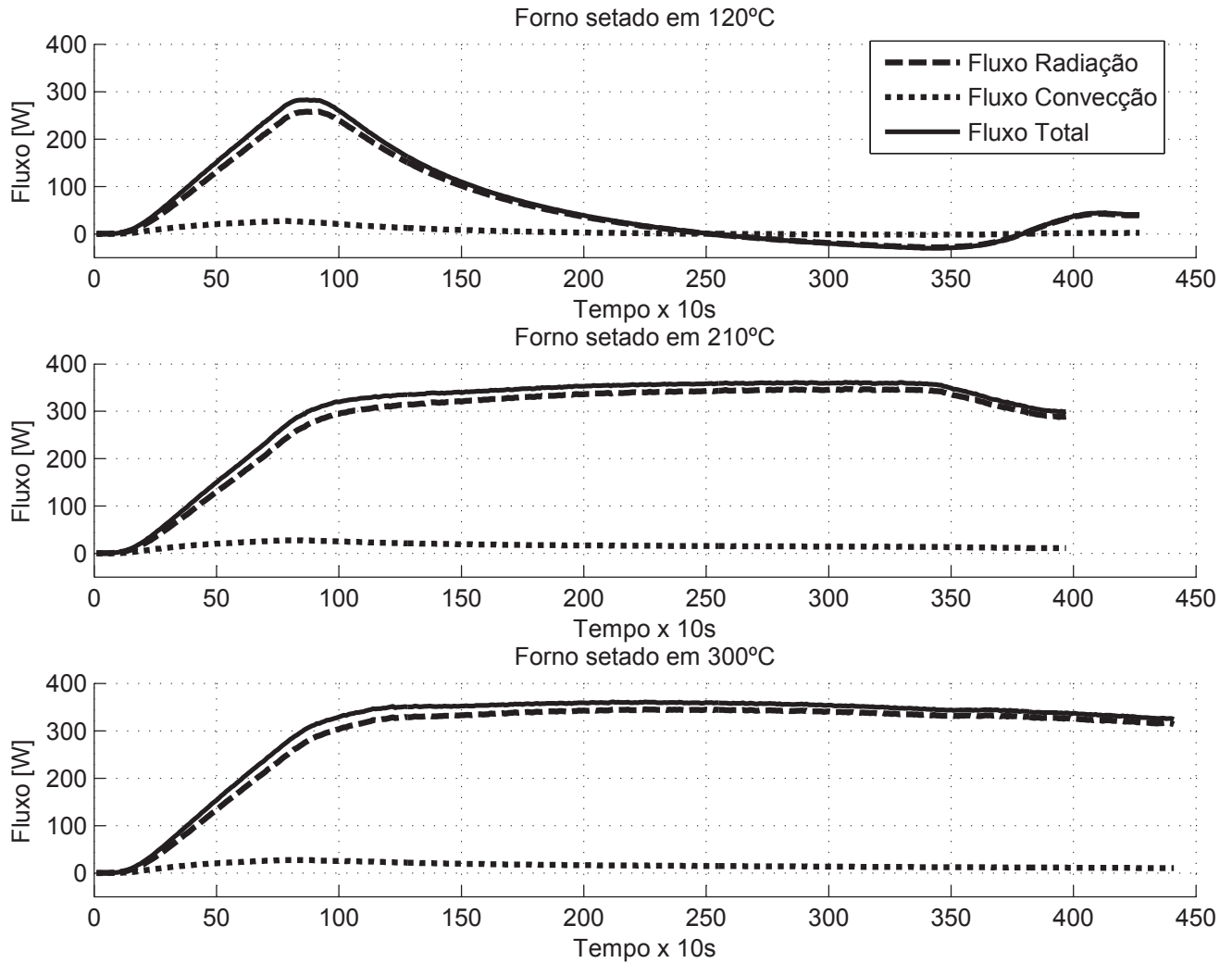


Figura 5.2: Fluxos de calor total, por radiação e convecção na base do corpo de prova para os experimentos setados em 120°C , 210°C e 300°C .

Observa-se (Figura 5.4) que para esta superfície a convecção influencia mais o aquecimento do que na base e no topo, pois, neste caso a área é menor influenciando diretamente no fator de forma e diminuindo o calor trocado por radiação. A mesma perda de calor é observada no experimento 120°C uma vez que a temperatura do ar é a que sofre o menor decaimento nesta fase do experimento.

- Fluxos de calor na lateral esquerda do corpo de prova

Observa-se na Figura 5.5 que os fluxos desta superfície tem o mesmo comportamento da lateral direita apenas o fluxo total é ligeiramente menor devido à esta superfície ter temperaturas

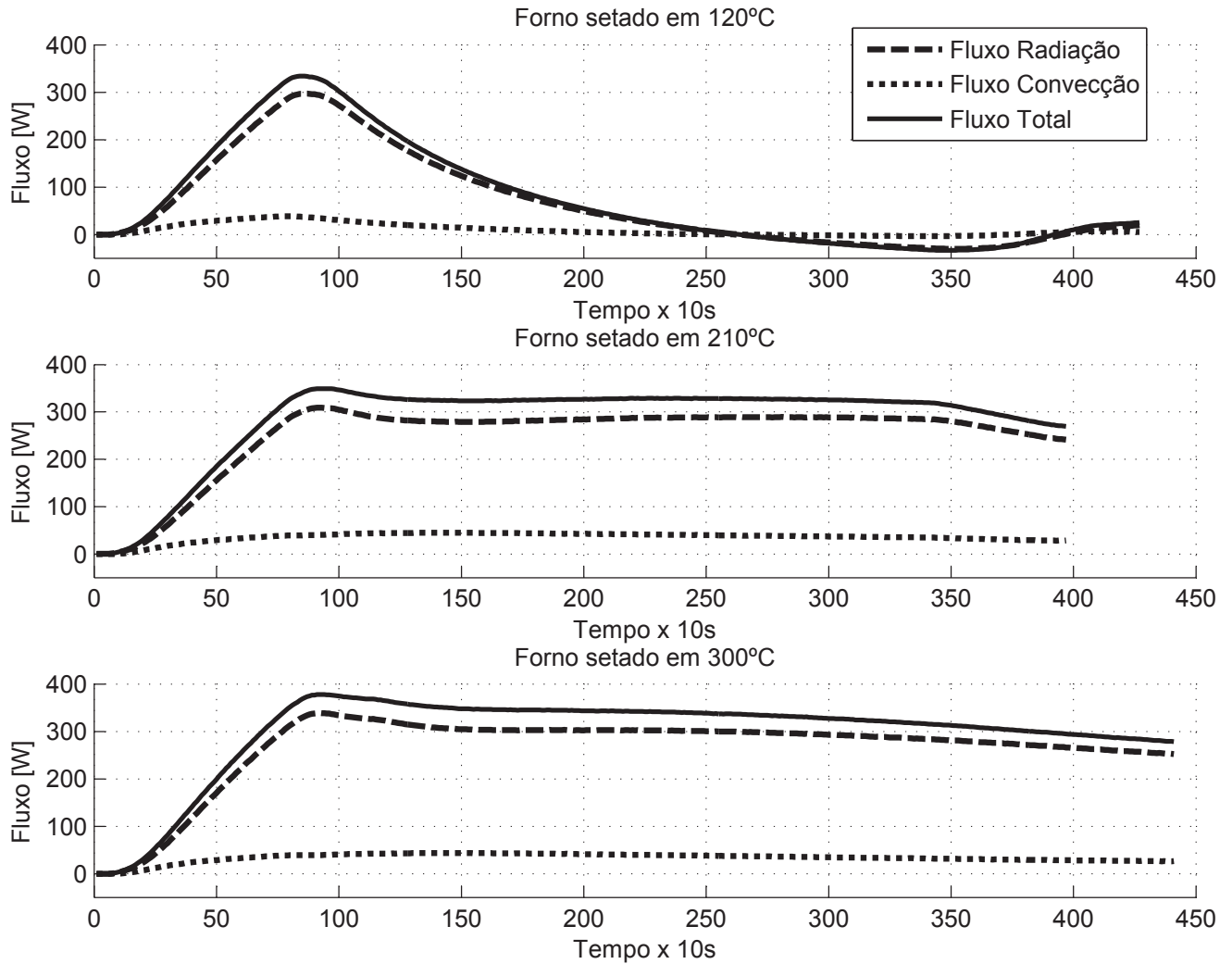


Figura 5.3: Fluxos de calor total, por radiação e convecção no topo do corpo de prova para os experimentos setados em 120°C , 210°C e 300°C .

ligeiramente maiores, o que fica mais evidenciado nos experimentos de 210°C e 300°C .

- Fluxos de calor na frente do corpo de prova

Observa-se na Figura 5.6 que para esta superfícies os fluxos de radiação são menores uma vez que a tampa do forno tem as menores temperaturas registradas em todos os experimentos e a menor área. Quanto à convecção, observa-se que os fluxos são similares aos fluxos nas superfícies laterais e no fundo, uma vez que o gradiente de temperatura em relação ao ar é praticamente o mesmo pois o tabuleiro é um bom condutor de calor e uniformiza a temperatura em sua superfície.

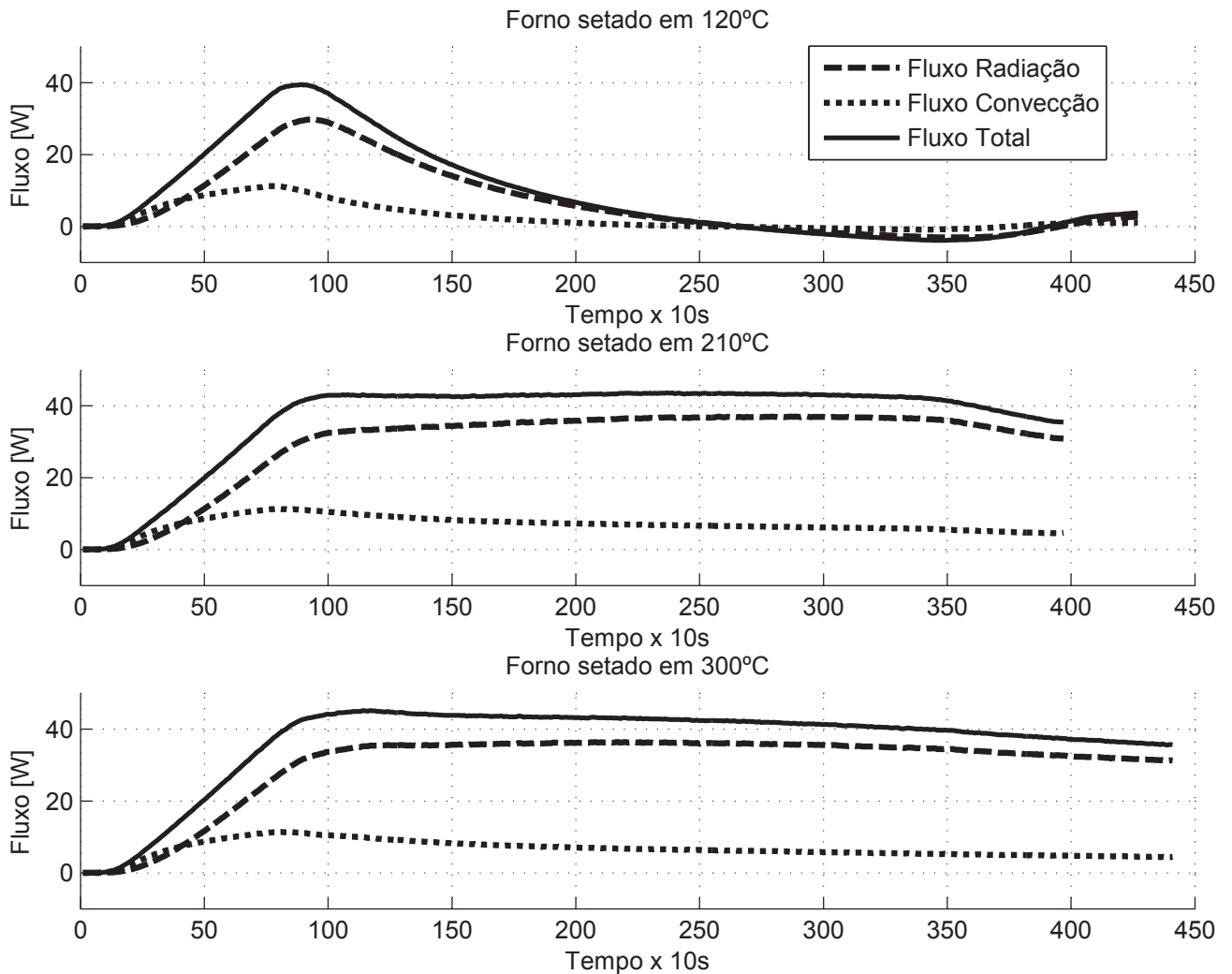


Figura 5.4: Fluxos de calor total, por radiação e convecção na lateral direita do corpo de prova para os experimentos setados em $120^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $300^{\circ}C$.

Observa-se ainda que para o experimento de $210^{\circ}C$ esta é a face que tem a maior perda de calor na fase de decaimento da temperatura.

- Fluxos de calor no fundo do corpo de prova

Na figura 5.7 observa-se que para esta superfície, mesmo tendo um comportamento térmico semelhante às demais (exceto o topo e a base) tem fluxo de radiação menor, uma vez que tem, junto com a face da frente, a menor área superficial. Quanto à convecção, tem-se o mesmo comportamento das laterais e da frente pela mesma razão das propriedades térmicas do tabuleiro.

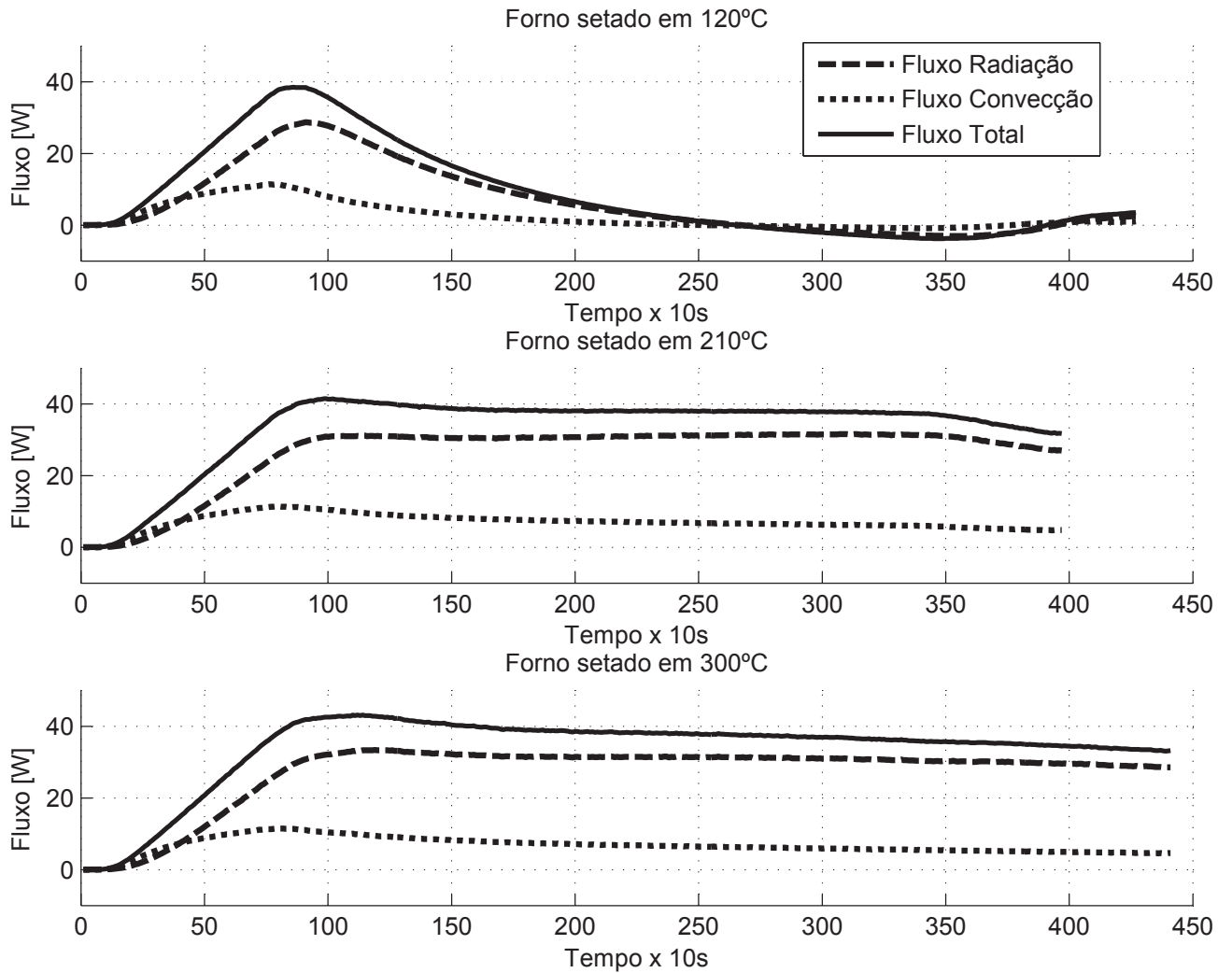


Figura 5.5: Fluxos de calor total, por radiação e convecção na lateral esquerda do corpo de prova para os experimentos setados em 120°C , 210°C e 300°C .

Pode-se observar nos resultados e análises apresentados que:

O forno provoca uma certa uniformidade na distribuição de temperatura na superfície da amostra, porém em grandeza diferentes daquela setada no experimento.

O pré-aquecimento sugerido pelo fabricante não se mostra eficiente para a temperatura setada em 120°C pois nas paredes do forno e no ar ocorrem grandes oscilações de temperatura.

Os efeitos de radiação são predominantes quando comparados aos efeitos de convecção.

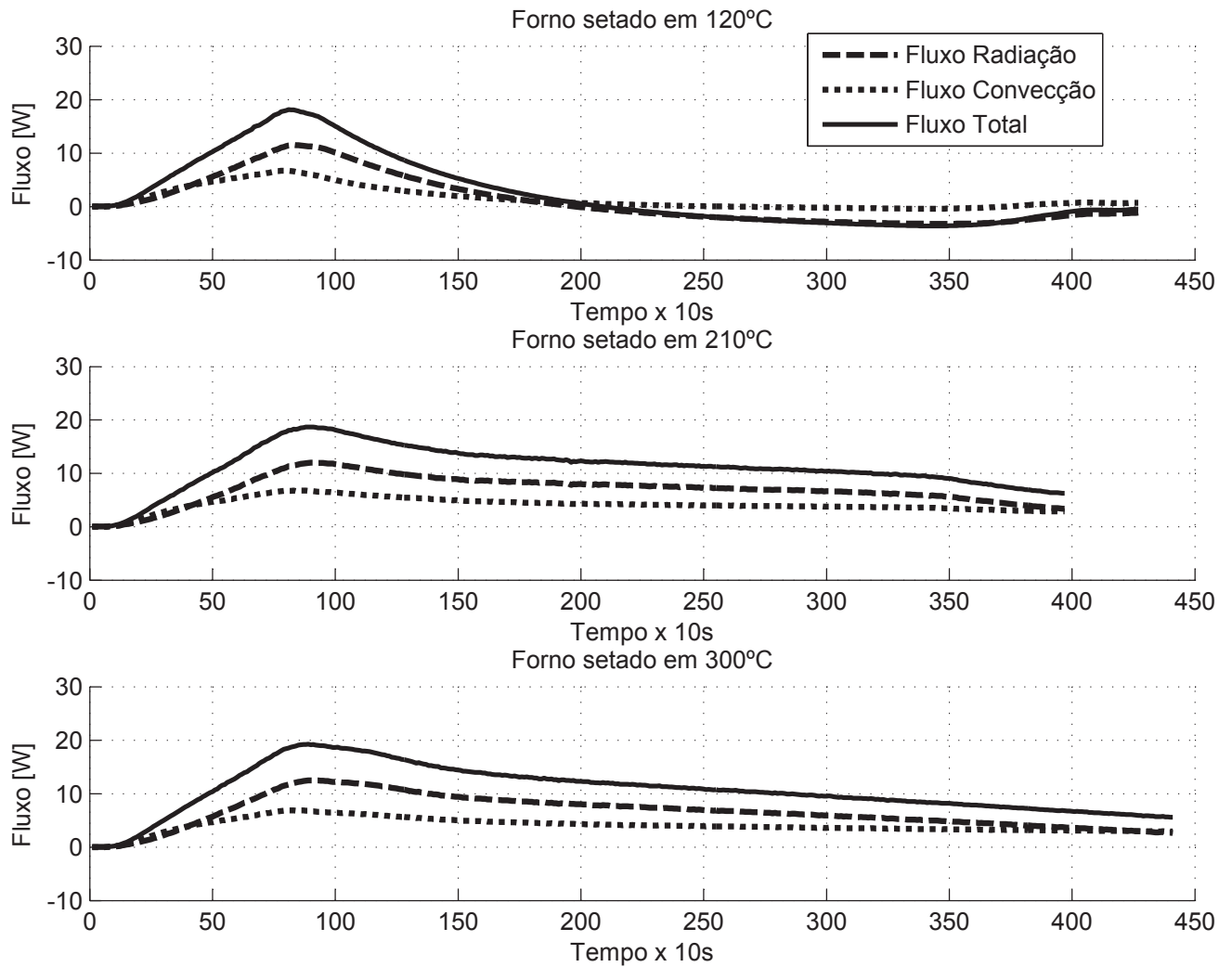


Figura 5.6: Fluxos de calor total, por radiação e convecção na frente do corpo de prova para os experimentos setados em 120°C , 210°C e 300°C .

Os fluxos de calor se mantêm constantes à medida em que o forno tende a entrar em equilíbrio térmico com a amostra.

A forma de alumínio por ter boa condutividade térmica distribui o calor ao longo de sua superfície, minimizando os efeitos da baixa temperatura da tampa do forno sobre a face da amostra paralela à tampa do forno.

O tempo para se alcançar o regime varia de 1200s a 1500s ($20\text{a}25\text{minutos}$), diferente do tempo de pré-aquecimento sugerido pelo fabricante que é de 10 a 15minutos .

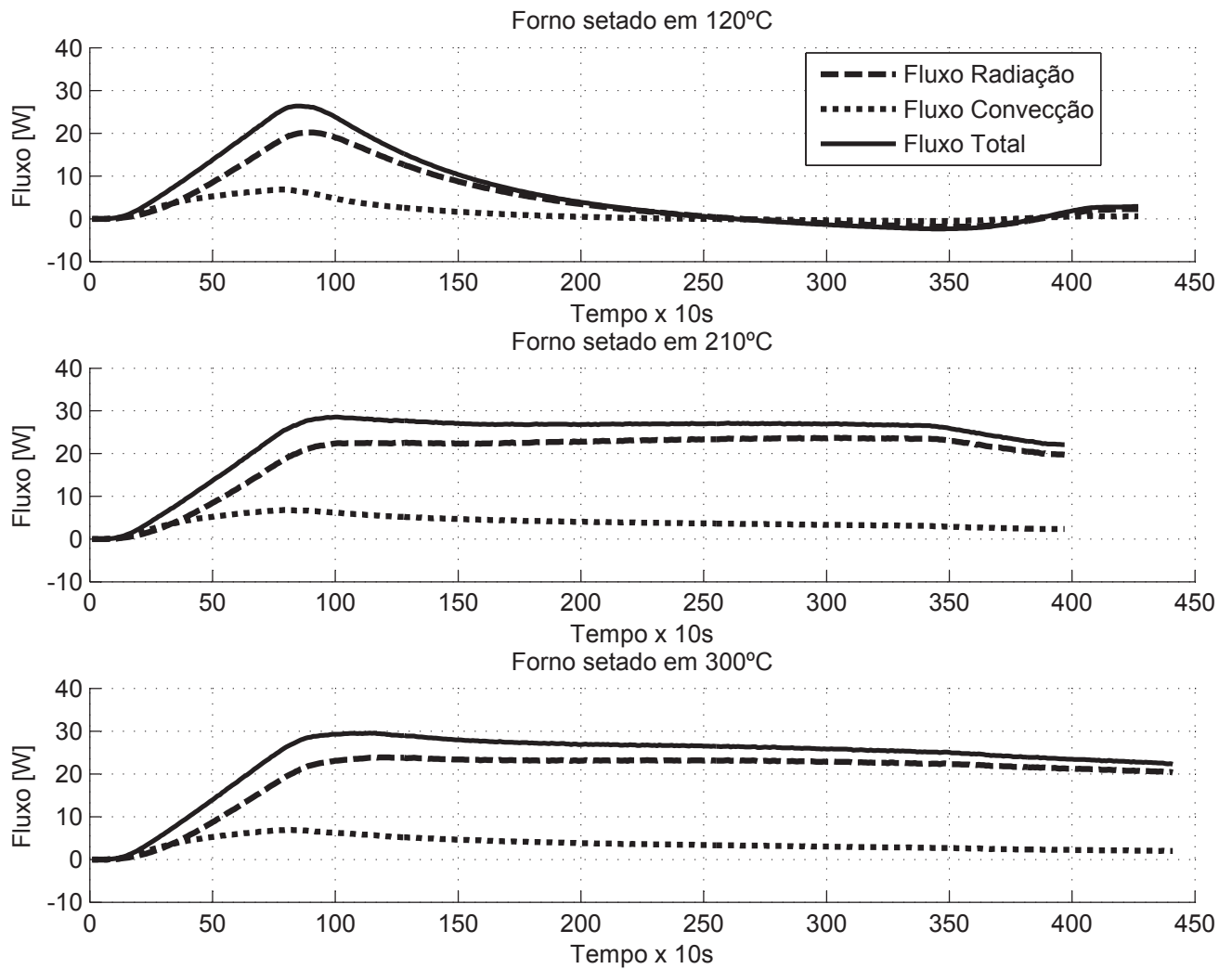


Figura 5.7: Fluxos de calor total, por radiação e convecção no fundo do corpo de prova para os experimentos setados em 120°C , 210°C e 300°C .

Capítulo 6

Uso do método dos Algoritmos genéticos na solução de problemas inversos aplicados a fornos

Como já dito o objetivo do uso de um forno doméstico é aquecer uma amostra e mantê-la em regime. Assim, a aplicação da técnica de problema inverso busca, neste caso, encontrar quais os fluxos de calor atingem as faces do corpo de prova para provocar uma temperatura esperada ao longo de sua superfície. Neste trabalho testa-se a utilização do método dos algoritmos genéticos na convergência do problema inverso gerado.

6.1 Abordagem do problema: estimativa do perfil de evolução do fluxo de calor total nas superfícies da amostra

O problema foi dividido em duas partes. A primeira, problema direto, que busca encontrar um modelo de condução que represente o aquecimento da amostra segundo as influências das condições de contorno. Neste caso, como já dito, uma análise mais detida nas condições físicas e geométricas do problema podem levar a algumas simplificações. Observa-se que a amostra em estudo tem razão de aspecto ($\frac{L}{W}$) da ordem de 10 na direção Z. Assim, considerando ainda que os fluxos de calor devido a convecção e a radiação incidem uniformemente em cada superfície, o problema 3-D descrito pelas Eqs.(3.14 e 3.15) pode ser abordado como

um problema unidimensional na direção de sua espessura. Logo, apenas as componentes q_1 e q_2 na direção Z necessitariam ser obtidas.

A segunda parte é a proposição de um problema inverso para encontrar quais os fluxos de calor devem incidir nas superfícies da amostra para provocar um perfil de temperatura esperado. Neste caso, cria-se uma função erro quadrática entre uma temperatura medida no experimento (Y) e a temperatura calculada pelo modelo direto (T) que é dependente dos fluxos. O desenvolvimento do modelo inverso tem o objetivo de identificar o perfil de evolução do fluxo de calor em cada superfície do modelo. Embora os valores dos fluxos de calor também sejam obtidos, um fator de correção dos parâmetros envolvidos no processo é também estimado simultaneamente. Considerações sobre este parâmetro são apresentadas na secção 6.4.1. Em seguida, usa-se o método dos algoritmos genéticos para minimizar a função erro quadrática proposta, onde a resposta desta minimização (otimização) são os fluxos de calor que incidem na superfície e aproximam as temperaturas calculadas (T) das temperaturas conhecidas (Y).

6.2 Parte I - Problema direto

A distribuição da temperatura na carga foi modelada por funções de Green e usa-se as nomenclaturas sugeridas por (BECK et al., 1992). Com já descrito, observando-se as condições físicas e geométricas, a amostra tem razão de aspecto de ordem 10 na direção Z e os fluxos por convecção e radiação incidem uniformemente em cada superfície o problema será descrito como 1D fluxo-fluxo na direção Z .

As propriedades térmicas do bloco de concreto usado como parâmetro para a elaboração do modelo direto estão descritas na tabela 6.1 retiradas de (BERGMAN et al., 2011)

Tabela 6.1: Propriedades térmicas do bloco de concreto usado como parâmetro para construção do modelo direto

Propriedade	Valor [unidade]
Condutividade térmica (k)	1.4 $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
difusividade térmica (α)	69.16996×10^{-6} $\left[\frac{m^2}{s} \right]$

Assim, rerepresentado a solução descrita na secção 3.4.2, tem-se o problema apresentado

na figura 6.1 e representado pela equação 6.1

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.1)$$

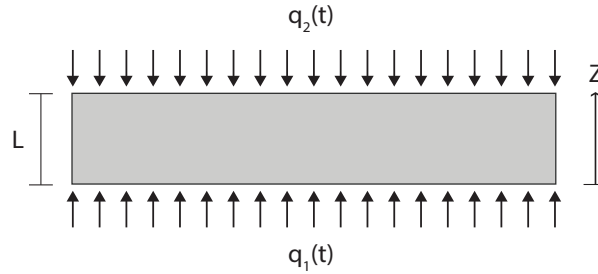


Figura 6.1: Problema 1D do tipo fluxo-fluxo na direção Z.

Sujeito às condições de contorno

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_z(t); \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} = q_{2z}(t) \quad (6.2)$$

e à condição inicial

$$T(z, 0) = F(z) = T_0 \quad (6.3)$$

Tem-se a solução geral em termo de função de Green (BECK et al., 1992)

$$\begin{aligned} T(z, t) = & T_0 \\ & + \frac{\alpha}{k} \int_0^t G_{Z22}(z, t|z', t-\tau) \frac{q_z(\tau)}{k} \Big|_{z'=0} d\tau \\ & + \frac{\alpha}{k} \int_0^t G_{Z22}(z, t|z', t-\tau) \frac{q_{2z}(\tau)}{k} \Big|_{z'=L} d\tau \end{aligned} \quad (6.4)$$

A $G_{Z22}(z, t|z', t-\tau)$ representa a função de Green do problema auxiliar 1D que é a versão homogênea do problema Eq.6.1. A FG, $G_{Z22}(z, t|z', t-\tau)$, pode ser facilmente encontrada (Apêndice X, (BECK et al., 1992)) e escrita como

$$G_{Z22}(z, t) = \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_m^{\infty} e^{-(\frac{m\pi}{L})^2 \alpha(t-\tau)} \cos\left(\frac{m\pi z}{L}\right) \cos\left(\frac{m\pi z'}{L}\right) \quad (6.5)$$

sendo $n = 1, 2, 3, \dots$

Separando-se os termos e integrando, tem-se:

$$I_1 = \frac{\alpha}{k} \int_0^\tau \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_m^\infty e^{-A_m^2 \alpha (t-\tau)} \cos(A_m z) \cos(A_m 0) q_z(\tau) d\tau \quad (6.6)$$

onde

$$A_m = \frac{m}{L} \pi \quad (6.7)$$

Ao integrar, obtém-se

$$I_1 = \frac{\alpha}{k} \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^r q_z(t_i) \Delta_t + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^\infty \cos(A_m z) \frac{1}{A_m^2 \alpha} \sum_{i=1}^r q_{zi} \left[e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_i))} - e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_{i-1}))} \right] \right] \quad (6.8)$$

sendo r um índice discreto que representa o instante t , ou seja, $t = r \Delta t$

Assim, integrando o segundo termo da (6.4)

$$I_2 = \frac{\alpha}{k} \int_0^\tau \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_m^\infty e^{-A_m^2 \alpha (t-\tau)} \cos(A_m z) \cos(A_m L) q_{2z}(\tau) d\tau \quad (6.9)$$

Ou seja

$$I_2 = \frac{\alpha}{k} \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^r q_{2z}(t_i) \Delta_t + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^\infty \cos(A_m z) \cos(m\pi) \frac{1}{A_m^2 \alpha} \sum_{i=1}^r q_{2zi} \left[e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_i))} - e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_{i-1}))} \right] \right] \quad (6.10)$$

Logo, a solução geral é dada por

$$\begin{aligned}
T(z, t) = & T_0 \\
& + \frac{\alpha}{k} \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^r q_z(t_i) \Delta t + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} \cos(A_m z) \frac{1}{A_m^2 \alpha} \sum_{i=1}^r q_{zi} \left[e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_i))} - e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_{i-1}))} \right] \right] \\
& + \frac{\alpha}{k} \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^r q_{2z}(t_i) \Delta t + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} \cos(A_m z) \cos(m\pi) \frac{1}{A_m^2 \alpha} \sum_{i=1}^r q_{2zi} \left[e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_i))} - e^{(-A_m^2 \alpha (t-t_{i-1}))} \right] \right]
\end{aligned} \tag{6.11}$$

Se os fluxos de calor q_z e q_{2z} não são desconhecidos, estabelece-se, um problema inverso.

6.3 Parte II - Problema inverso

O conceito de problema inverso é encontrar possíveis causas para um efeito conhecido. Para este problema tem-se as temperaturas conhecidas pelo experimento (efeito) e busca-se encontrar quais os fluxos de calor em cada face do corpo de prova (causas) as geraram. Além disso, deve-se conhecer uma relação matemática entre a causa e efeito (problema direto) que para este caso é um modelo de condução de calor 1D do tipo G22 já descrito.

Os fluxos $q_z(t)$ e $q_{2z}(t)$ são obtidos pela minimização da função erro quadrática descrita por,

$$S_{mq} = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^N [Y_{i,j} - T_{i,j}]^2 \tag{6.12}$$

onde i e j são, respectivamente, os índices de superfície e de tempo. $Y_{i,j}$ é a temperatura experimental, $T_{i,j}$ é a temperatura calculada pelo modelo direto (6.11), s é o número de termopares e N é o número total de temperaturas medidas. Nota-se que os fluxos $q_z(t)$ e $q_{2z}(t)$ são obtidos pela comparação entre a temperatura calculado pelo modelo direto e a temperaturas medidas no experimento nas superfícies do corpo de prova.

A equação 6.12 será minimizada pela técnica dos algoritmos genéticos que foi escolhido por não precisar de derivadas contínuas e ser de fácil implementação.

6.3.1 Algoritmo genético

O método dos algoritmos genéticos é baseado na idéia da evolução pela seleção natural onde o mais "adaptado" permanece. O método inicia-se com um número de indivíduos (população) e a cada ciclo do algoritmo (geração) os indivíduos com o maior valor numérico tende, estatisticamente, a substituir os de menor valor, levando a função a um valor máximo.

Cada indivíduo da população é um conjunto de valores das variáveis que compõem a função objetivo que quando aplicados geram um valor para a função, representado por códigos binários (código genético), sendo cada bit um "gen".

A partir daqui três operadores de evolução são aplicados.

- Reprodução

Este operador basea-se em uma roda de loteria onde os indivíduos que atribuem maior valor à função objetivo tem maior probabilidade de compor a geração seguinte. Após a atribuição das probabilidades, substitui-se cada indivíduo da geração atual por outro sorteado, formando uma nova população com o mesmo número de indivíduos da anterior.

- Cruzamento

Este operador mistura, aleatoriamente, partes dos indivíduos da população. Separando 2 indivíduos, marca-se partes de suas cadeias e as troca de lugar, gerando 2 novos indivíduos. Faz-se isso até cruzar todos os indivíduos da população.

- Mutação

Este procedimento é o que menos interfere no processo e existe para tentar recuperar ou gerar possíveis indivíduos que não foram avaliados. Acontece invertendo-se para 0 ou 1 o bit (gen) a cada numero muito grande de bits gerados, por exemplo, inverte-se o bit a cada 10000 de bits gerados, em cada geração.

Assim, a população evolui até que a diferença do valor da função objetivo gerado por cada indivíduo da população seja menor que um erro preestabelecido. Isto representa que todos os indivíduos evoluíram para o ponto de ótimo.

6.4 Resultados e análise

Como já apresentado nos resultados experimentais, as curvas de aquecimento das superfícies do corpo de prova tem um comportamento transiente seguida de um comportamento quase estático (quase permanente). O modelo direto proposto é transiente, logo, na região posterior ao aquecimento do forno e da amostra (regime quase-estático) o modelo não é bem ajustado. Outro efeito nos resultados é o uso de um modelo 1D e considerar a amostra como um bloco de concreto, suprimindo os efeitos do contato e do material do tabuleiro de alumínio.

Outra característica do uso deste método é a capacidade de obtenção das componentes por convecção e radiação apenas instrumentando as amostras. Evitando a instrumentação do forno, as complicações geométricas da modelagem da radiação, dificuldade de fixação de termopares nas paredes do forno, dificuldades das soluções empíricas e as dificuldades das soluções de escoamento.

6.4.1 Estimativa do perfil de evolução do fluxo de calor total devido a convecção e radiação. Uso de um fator k para correção de parâmetros físicos indeterminados no modelo térmico

A aplicação de técnicas de problemas inversos envolve, intrinsecamente, o uso de dados experimentais e modelos teóricos que simulam o comportamento destes dados. Por exemplo, neste caso, o comportamento das temperaturas medidas experimentalmente em cada face da amostra aquecida no interior do forno deve ser previsto pelo modelo térmico proposto. Caso o modelo térmico seja adequado, a minimização dos desvios entre as temperaturas calculadas e medidas representa o caminho para a obtenção dos parâmetros de interesse do problema, que no problema estudado é a obtenção dos fluxos de calor impostos nas superfícies.

Em um problema de otimização clássico, todos os parâmetros envolvidos no modelo teórico, em teoria, podem ser estimados simultaneamente com do uso de algoritmos potentes de minimização ou maximização. Estes parâmetros, presentes nos modelos teóricos, são chamados variáveis de projeto caso sejam considerados desconhecidos.

A grande dificuldade, na abordagem direta de um problema de otimização de múltiplas variáveis reside na presença de mínimos locais, principalmente quando dois dos parâmetros envolvidos, tratam-se na realidade de funções a serem estimadas sem as quais o problema

direto não pode ser resolvido diretamente, pois representam as condições de contorno do próprio problema.

Optou-se assim, nesta primeira abordagem pela estimativa dos fluxos de calor porém considerando as propriedades térmicas envolvidas no modelo térmico como conhecidas. Um fator de correção, entretanto foi estimado simultaneamente de forma a corrigir as incertezas destas propriedades, considerando, neste caso, o fluxo total calculado pelos modelos de radiação e convecção como conhecidos. Este procedimento, de fato, implica na obtenção segura apenas do perfil de aquecimento dos fluxos de calor, sendo os valores absolutos deste fluxo apenas um indicativo da potencialidade da técnica.

Buscou-se nesta secção verificar se o método dos algoritmos genéticos converge a estimativa do problema inverso para o perfil dos fluxos calculados pelos modelos de radiação e convecção já apresentados na secção 5.1 e apresentam-se a seguir, considerações sobre as propriedades térmicas e incertezas envolvidas no problema inverso (modelo e experimento):

1. O modelo térmico prevê apenas uma camada (cimento) enquanto o experimento é de duas camadas (cimento e forma de alumínio). Assim, as temperaturas experimentais, são medidas em ambos materiais embora o efeito do alumínio seja desprezado no modelo teórico.
2. Somente uma emissividade térmica é considerada no modelo teórico (direto) para o cálculo do efeito da radiação térmica.
3. Condutividade térmica e difusividade térmica do modelo teórico são consideradas homogêneas e previstas para uma amostra de cimento da literatura. Como a composição química e conteúdo de umidade são desconhecidas, este valor pode ou não ser diferente do real.
4. O modelo é unidimensional enquanto as temperaturas medidas representam os resultados de todas as influências físicas presentes no experimento.
5. A estimativa do fator de correção k somente é possível a partir da consideração que os fluxos totais sejam conhecidos. Caso contrário, os valores de fluxo de calor obtidos são extremamente dependentes das propriedades térmicas da amostra aquecida.
6. O modelo direto é considerado homogêneo ao passo que a amostra é fortemente heterogênea, pois o concreto que compõe a amostra é uma mistura na proporção em volume de dois de areia para um de cimento que dificilmente foi misturada até atingir uma mistura puramente homogênea.

7. A temperatura experimental foi medida na superfícies de alumínio e de concreto, porém na convergência do modelo inverso considera-se que no experimento mediu-se a temperatura na superfície do bloco de concreto, negligenciando a forma de alumínio.

Isto posto, nota-se que, do ponto de vista das propriedades térmicas e modelos teóricos, é limitada a comparação direta entre o fluxo estimado na otimização do modelo inverso e o fluxo calculado usando modelos simplificados q_{rad} e q_{conv} . Assim, optou-se por estimar o perfil de evolução e não o valor absoluto dos fluxos. Neste caso um fator k (constante) foi também estimado para a correção das grandezas desconhecidas presentes no modelo. Este fator engloba todas as considerações e simplificações feitas na elaboração do problema direto.

Nas figuras 6.2 a 6.7 apresentam-se os fluxos estimados corrigidos por um fator k junto ao fluxo calculado pelas equações de radiação e convecção apresentadas na secção 5.1.

6.4.1.1 Experimento setado em $120^{\circ}C$

- Fluxos de calor na base do corpo de prova

Na figura 6.2 mostra-se, para um fator $k = 2.8$, que o fluxo estimado reproduz o fluxo calculado na parte transiente (de 0 a 700s). Como o experimento setado em $120^{\circ}C$ não atinge um comportamento quase estático, o método consegue acompanhar o perfil do fluxo calculado mesmo depois do período de aquecimento.

- Fluxos de calor no topo do corpo de prova

Observa-se na figura 6.3 que, para um fator $k = 3.5$, o fluxo estimado reproduz o fluxo calculado de 0 a 700 segundos. Como na base, o método consegue acompanhar o perfil do fluxo calculado depois do período de aquecimento.

Nota-se que o método acompanha o fluxo calculado nas figuras 6.2 e 6.3, porém com fatores de correção (k) diferentes, isto porque o modelo considera as duas superfícies sendo do mesmo material e os fluxos calculados consideram as situações reais onde as superfícies são de materiais diferentes.

6.4.1.2 Experimento setado em $210^{\circ}C$

- Fluxos de calor na base do corpo de prova

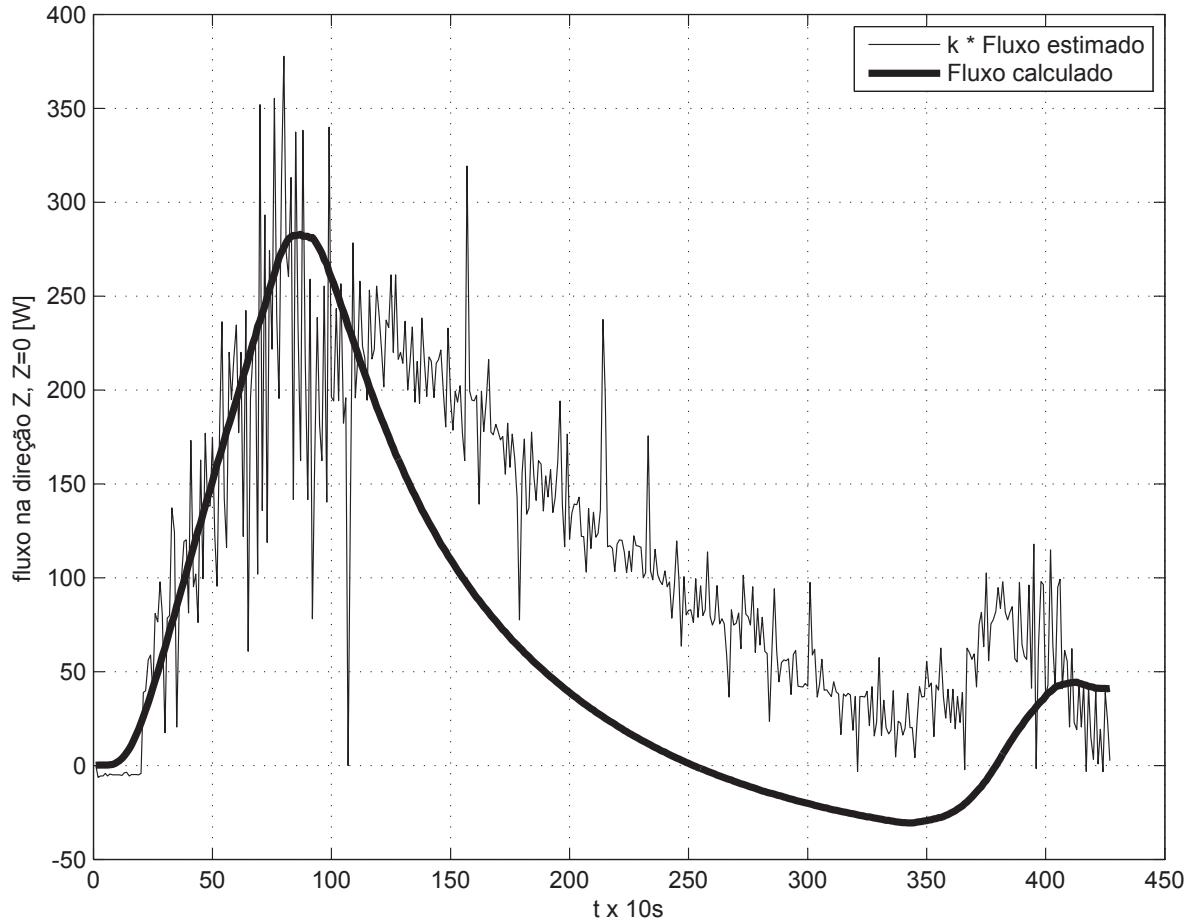


Figura 6.2: Fluxos estimados e calculados na base do corpo de prova para o forno setado em $120^{\circ}C$.

Observa-se na figura 6.4 que, para um fator $k = 2.8$, o fluxo estimado acompanha o fluxo calculado de 0 a 800 segundos. No regime permanente os fluxos se divergem uma vez que o método modela o regime permanente.

- Fluxos de calor no topo do corpo de prova

Para um fator de correção de $k = 3.5$, observa-se na figura 6.5 que o fluxo estimado representa o fluxo calculado no período de aquecimento da amostra.

6.4.1.3 Experimento setado em $300^{\circ}C$

- Fluxos de calor na base do corpo de prova

A figura 6.6 apresenta que, para um fator de correção $k = 2.8$, o fluxo estimado representa o fluxo calculado no regime transiente.

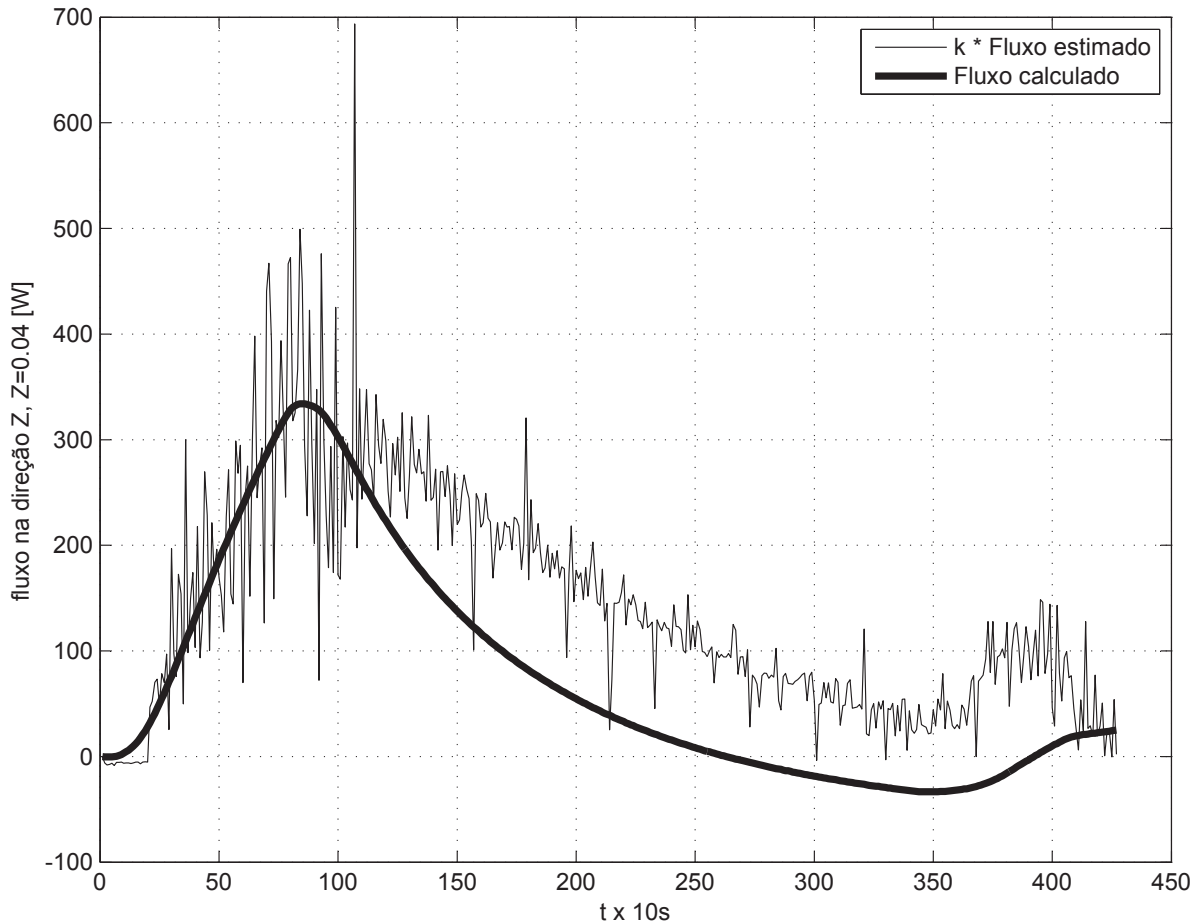


Figura 6.3: Fluxos estimados e calculados no topo do corpo de prova para o forno setado em $120^{\circ}C$.

- Fluxos de calor no topo do corpo de prova

Observa-se na figura 6.7 que, para um fator de correção $k = 3.5$, o fluxo estimado representa o fluxo calculado para a parte transiente processo (0 a 800 segundos).

6.5 Conclusões sobre o uso de algoritmo genético na solução de problemas inversos

O problema inverso é caracterizado por ser mal posto, ou seja, existem várias combinações de causas (neste caso fluxos) que provocam o efeito conhecido (temperaturas na superfície do corpo de prova). Sendo assim, a eficiência de um método pode ser medida pela sua capacidade de convergência, ou capacidade de representar o fluxo real visto que em problemas de validação conhece-se as causas e os efeitos do problema proposto.

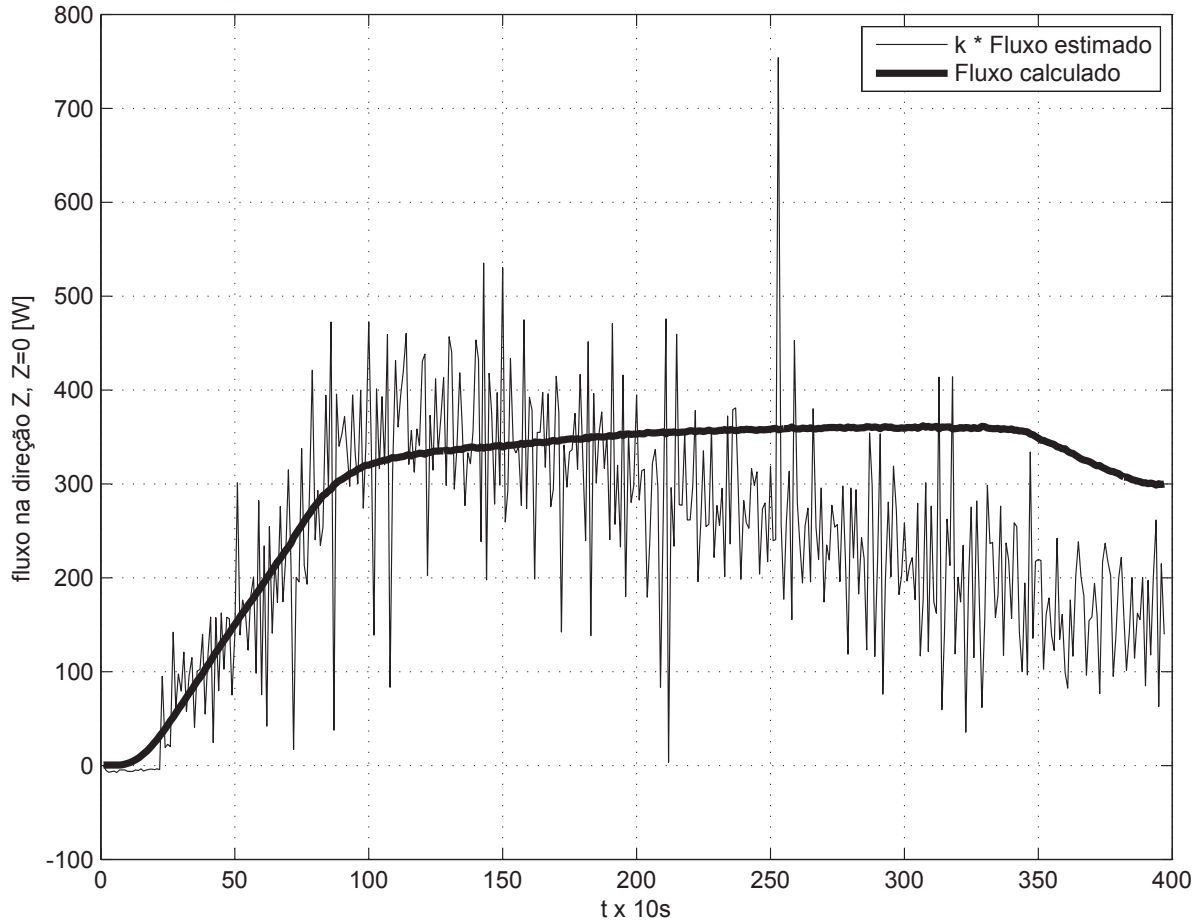


Figura 6.4: Fluxos estimados e calculados na base do corpo de prova para o forno setado em $210^{\circ}C$.

Isto posto, o método dos algoritmos genéticos se mostrou uma ferramenta possível de ser usada uma vez que conseguiu convergir a solução para os fluxos reais calculados nas partes transientes que é o comportamento representado pelo modelo direto. Encontrou-se como divergência as grandezas dos fluxos uma vez que o problema foi modelado como 1D e sofre interferência direta do comprimento do corpo na direção calculada, além do conhecimento real das propriedades κ (condutividade térmica), α (difusividade térmica) e ε (emissividade térmica) tanto da forma de alumínio, quanto da amostra e das paredes do forno.

Nota-se também que o fator de correção para o fluxo na face da base é $k = 2.8$ e para a face do topo é $k = 3.5$ para todos os experimentos, isto porque no fluxo calculado as superfícies são de materiais diferentes, topo é concreto e a base é alumínio. Isto mostra a força do método e a potencialidade de sua utilização para problemas complexos desde que o modelo direto e as propriedades térmicas sejam bem definidas.

Observa-se que a potencialidade do uso dos Algoritmos Genéticos apontam que a apli-

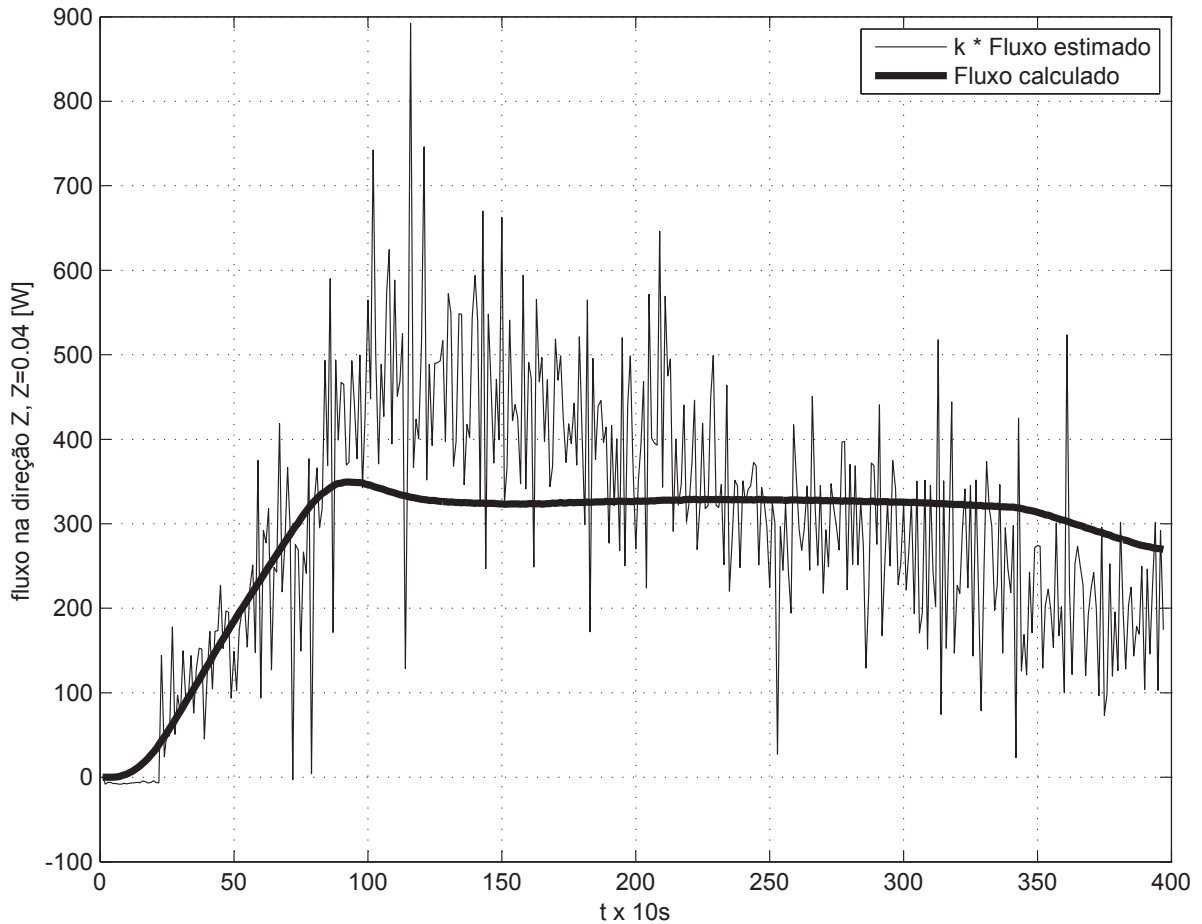


Figura 6.5: Fluxos estimados e calculados no topo do corpo de prova para o forno setado em $210^{\circ}C$.

cação em modelo 3D transiente certamente conduzirão a resultados satisfatórios, sendo uma ferramenta extremamente importante para a otimização de fornos. Por exemplo:

- Aplicação para obtenção das temperaturas das paredes necessárias ao alcance das temperaturas desejadas no alimento.
- Obter a quantidade de calor necessária para obtenção de uma temperatura uniforme nas faces.
- Obter a potência do forno necessária para atingir, no corpo de prova, a temperatura setada pelo usuário.
- Obter qual o padrão de pré-aquecimento adequado a cada faixa de temperatura de utilização do forno.

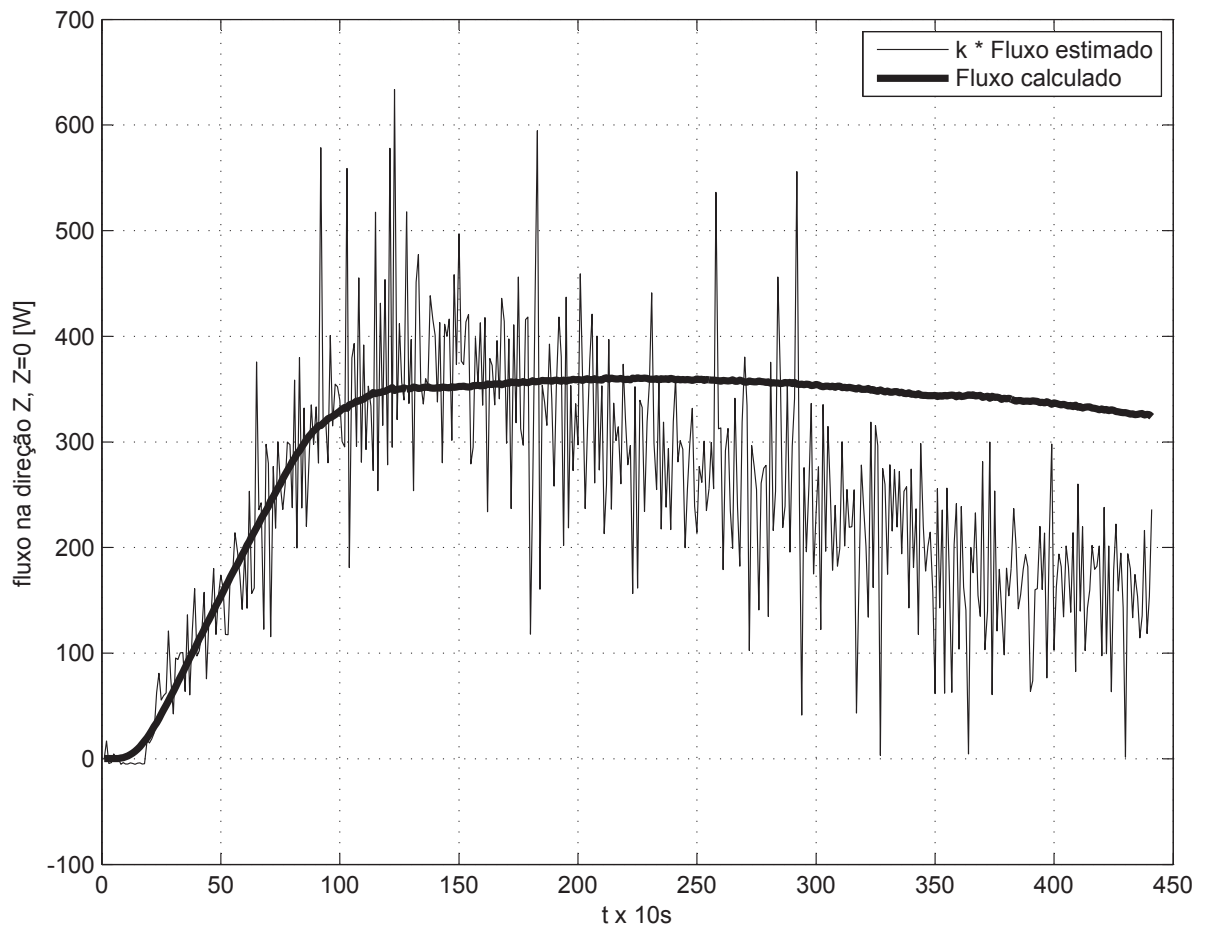


Figura 6.6: Fluxos estimados e calculados na base do corpo de prova para o forno setado em $300^{\circ}C$.

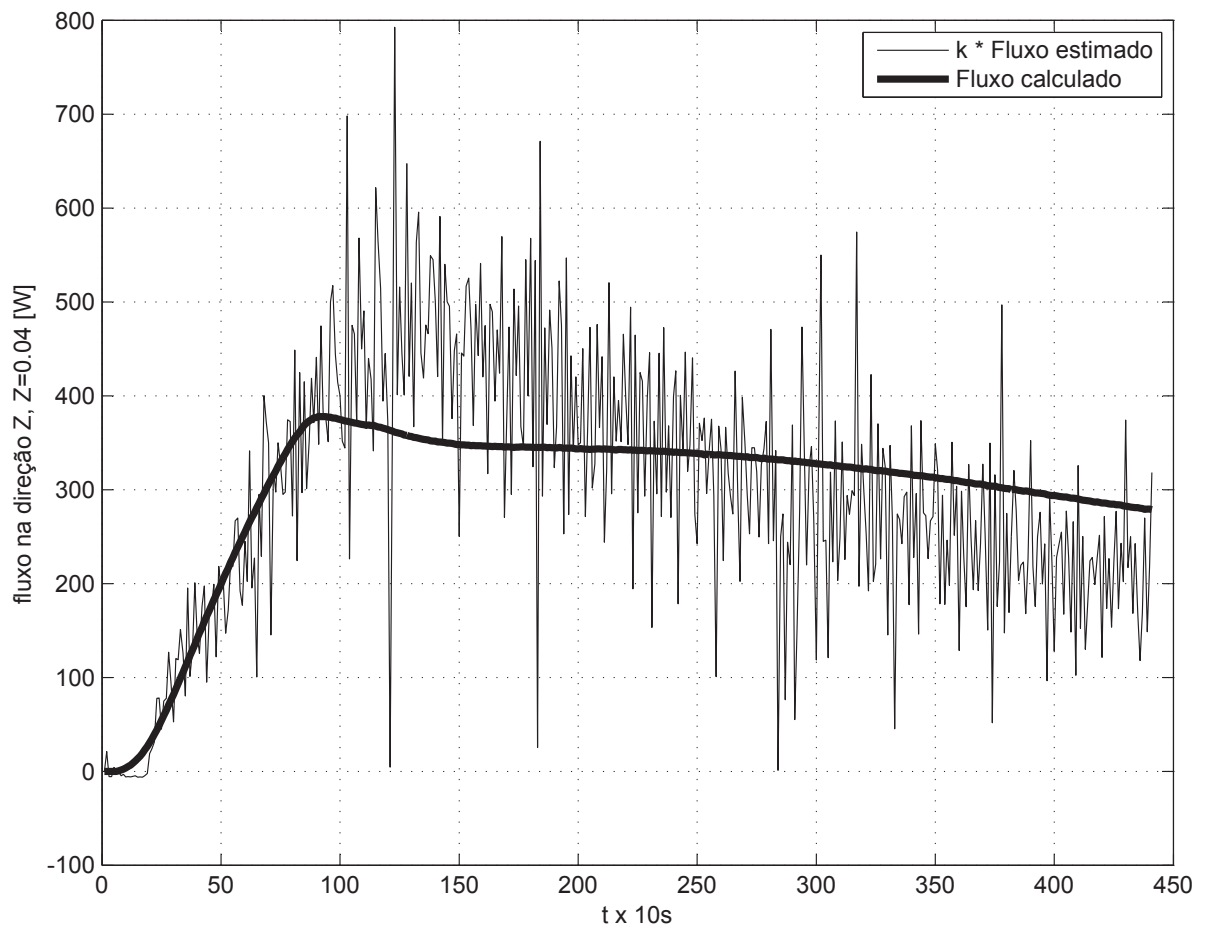


Figura 6.7: Fluxos estimados e calculados no topo do corpo de prova para o forno setado em $300^{\circ}C$.

Capítulo 7

Conclusões

O trabalho cumpriu os propósitos de avaliar um corpo aquecendo-se no interior de um forno elétrico e as influências dos processos de convecção e radiação neste aquecimento. Apresentou-se uma avaliação do uso do método de algoritmos genéticos na solução de problemas inversos que é um ponto de partida para a avaliação e otimização do processo. Neste contexto, alguns pontos são evidenciados.

O forno elétrico consegue manter uma certa homogeneidade na distribuição da temperatura na superfície da amostra, porém em grandezas diferentes daquelas setadas pelo usuário.

A proposta de pré-aquecimento sugerida pelo fabricante não se mostra ajustada para o experimento setado em $120^{\circ}C$, uma vez que as temperaturas nas paredes do forno e do ar sofrem grandes oscilações.

Os efeitos de radiação são predominantes comparados aos de convecção.

Os fluxos de calor se mantêm constantes à medida em que o forno tende a entrar em regime térmico com a amostra.

A forma metálica minimiza os efeitos de perda de calor pela tampa do forno na superfície da amostra que está paralela a ela, uma vez que a forma distribui o calor ao longo de sua superfície devido à sua boa condutividade térmica.

O método dos algoritmos genéticos se mostrou uma ferramenta possível de ser usada para a solução de problemas inversos.

O modelo 1D interfere na grandeza dos fluxos de calor calculados no problema inverso devido a influencia dos cumprimentos em cada direção avaliada.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Estimar qual a potência necessária para que a amostra no interior do forno atinja a temperatura setada pelo usuário.

Avaliar maneiras de interferir no processo para alcançar as temperaturas setadas com o menor consumo de energia possível (otimizar o forno).

Uma vez mostrado que a radiação é predominante, avaliar o efeito da distribuição dos queimadores ao longo das paredes do forno para a melhoria do processo.

Avaliar o efeito de uma aleta em “U” que servirá como suporte para as grades de apoio no interior do forno e com um distribuidor da temperatura. Haja visto que uma placa metálica ajuda na uniformização da temperatura como visto na face do corpo de prova paralela à tampa do forno.

Avaliar o método de algoritmo genético na soluções de problemas inversos com fluxos críticos, como fluxos pulso, quadrados, senoidal crescente e outros.

Construir dois modelos diretos, um transiente para a fase de aquecimento e outro permanente para o estado quase-estático, utilizando a junção dos dois como base para a construção de um problema inverso.

Avaliar o efeito do uso de outros tabuleiros, como forma redondas, de vidro transparente e de vidro fosco.

Propor uma maneira de utilizar convecção forçada e avaliar seus efeitos no aquecimento e na economia de energia.

Referências Bibliográficas

ARPACI, V. S. *Conduction Heat Transfer*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1966.

BECK, J. V. et al. *Heat Conduction Using Green's Function*. Washington, DC: Hemisphere Publishing, 1992.

BEJAN, A. *Convection heat transfer*. 1. ed. Duke University: Jhon Wiley and sons, 1984.

BERGMAN, T. et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, 2011. ISBN 9780470501979. Disponível em: <<http://books.google.ca/books?id=vvyIoXEywMoC>>.

BILLAH, M. M. et al. Finite element analysis of mhd mixed convection heat transfer enhancement of a heat-generating block in a double lid-driven enclosure filled with air at different vertical location. In: *First conference on clean energy and technology*. [S.l.: s.n.], 2011.

BIN, W.; JIANGQI, L.; RUIBIN, C. Thermal field simulation of glass bending oven using finite volume method. *IEEE*, v. 1, p. 547–550, 2009.

CHOPADE, R. P. et al. Effects of locations of a 3-d design object in a 3-d radiant furnace for prescribed uniform thermal conditions. *Applied thermal engineering*, v. 31, p. 3262–3274, 2011.

DANON, B. et al. Numerical investigation of burner positioning effects in a multi-burner flameless combustion furnace. *Applied thermal engineering*, v. 31, p. 3885–3896, 2011.

EHLERT, J. R.; SMITH, T. F. View factors for perpendicular and parallel rectangular plates. *Thermophys Heat Transfer*, v. 7, n. 1, p. 173–174, 1993.

FAN, Q. et al. Experimental study on the heat flux distribution of a laboratory-scale wall-fired furnace. *energy&fuels*, v. 24, p. 5369–5377, 2010.

- FERNANDES, A. P. *Funções de Green: Soluções aplicadas a problemas inversos em condução de calor*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2009.
- HOWELL, J. R. *A Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors*. 2nd. ed. [S.l.: s.n.], 1982.
- IUSTINIAN, M.; MARIA, A. *Modeling and simulation of the transient heating regime in an electrical oven*. Dissertação (Mestrado) — University of Craiva, 2009.
- KAYS, W.; CRAWFORD, M.; WEIGAND, B. *Convective Heat and Mass Transfer*. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2005. (McGraw-Hill series in mechanical engineering).
- MALHEIROS, F. C. *Temperaturas medidas e análises estatísticas dos experimentos em um forno elétrico doméstico*. [S.l.], 2013.
- NAVANEETHAKRISHNAN, P.; SRINIVASAN, P. S. S.; DHANDAPANI, S. Numerical and experimental investigation of temperature distribution inside a heating oven. *Journal of food processing and preservation*, v. 34, p. 275–288, 2008.
- ÖZIŞİK, M. N. *Heat Conduction*. 2. ed. Nova Iorque, NY: John Wiley & Sons, 1993.
- SIEGEL, R.; HOWELL, J. R. *Thermal Radiation Heat Transfer*. NASA, University of Houston: McGraw-Hill Kogakusha, 1972.
- VANDERPLAATS, G. N. *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*. New York, NY: McGraw-Hill College, 1984.