

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES TÉRMICAS DE COCÇÃO E
DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA PIZZA**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

BIANCA SENS DOS SANTOS

FLORIANÓPOLIS

2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES TÉRMICAS DE COCÇÃO E
DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA PIZZA**

BIANCA SENS DOS SANTOS

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Marcia B. H. Mantelli, PhD – Orientadora

Prof. Alicia de Francisco, PhD – Coorientadora

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D.Sc. – Coordenador do Curso

Banca Examinadora

Prof. Fernando Cabral, PhD. – Presidente

Prof. Jader Riso Barbosa Jr., PhD.

Prof. Celso Peres Fernandes, PhD.

Prof. Haiko Hense, PhD. (ENQ/UFSC)

*a Deus
pela vida
pela fé
pelas conquistas
e pela persistência*

AGRADECIMENTOS

Agradecer a todos que me ajudaram nesse estudo não é tarefa fácil. Certamente o maior perigo é, ao ser seletivo nos agradecimentos, deixar de incluir aqui aqueles que contribuíram para o fim desta etapa. Então, aos meus amigos que de uma forma ou de outra contribuíram com sua amizade, sugestões ou qualquer forma de apoio para a realização deste trabalho, expresso a minha mais profunda gratidão; certa de que, ainda que não tenham seus nomes aqui citados, foram fundamentais para mim.

Meu maior agradecimento dirige-se aos meus pais e irmãos, pela paciência, compreensão e amor, ainda que, por vezes, não tenha conseguido enxergar tais sentimentos.

Agradeço especialmente a minha orientadora, professora Marcia B.H. Mantelli, por ter acreditado neste trabalho, por ter sido mestre na essência, a quem tenho grande admiração e respeito. Agradeço ainda, a minha co-orientadora, professora Alicia de Francisco, do Departamento de Ciência dos Alimentos da UFSC, por estar sempre disposta a me ajudar.

Agradeço a todos os queridos colegas que fazem parte da grande família do LEPTEN/LABTUCAL, por tornarem o ambiente de trabalho mais alegre e acolhedor. Agradeço em especial e dedico este trabalho ao Carlos Eduardo, estendendo os agradecimentos aos colegas Charles e Luiz, por nunca terem medido esforços para a realização deste trabalho, pelo profissionalismo, pela amizade e pelas boas risadas que comigo foram compartilhadas.

Agradeço aos meus queridos amigos Roberto Wolf Jr. e Francieli Dalcanton que, incondicionalmente, estiveram comigo nos momentos de maiores dificuldade e nos de felicidade também, apoiando-me e incentivando-me sempre. Muito obrigada!

Um agradecimento especial ao Prof. Fernando Cabral, pela colaboração essencial na parte estatística deste trabalho.

Agradeço ao Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela ajuda financeira concedida durante os anos do curso. À FINEP/Petrobrás pelo financiamento deste projeto.

“Ninguém pode construir em teu lugar as pontes que precisarás passar para atravessar o rio da vida. Ninguém, exceto tu, só tu. Existem, por certo, atalhos sem número, e pontes, e semi-deuses que se oferecerão para te levar além do rio; mas isso te custaria a tua própria pessoa; tu te hipotecarias e te perderias. Existe no mundo um único caminho por onde só tu podes passar. Onde leva? Não perguntes, segue-o.”

Nietzsche

RESUMO

Com o desenvolvimento de tecnologias de redução de energia, vêm surgindo no mercado diferentes tipos de fornos em substituição aos fornos a lenha e de lastro elétrico, como medida da adoção de políticas ambientalmente mais corretas e mais econômicas. A aplicação destas tecnologias assiste a indústria alimentícia no desenvolvimento de produtos de melhor qualidade, bem como, no estabelecimento de processos mais eficientes e no melhor controle dos processos existentes. Assim, o entendimento do impacto das diferentes condições de cocção sobre as transformações ocorridas no produto, associadas as suas propriedades sensoriais (textura, cor, sabor), torna-se uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento de novas tecnologias nesse setor. Além disto, para o projeto de fornos de cocção, é necessário o conhecimento das propriedades termofísicas do produto. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo estudar o impacto das diferentes configurações de um forno na qualidade da pizza, estabelecendo-se as melhores condições para a sua cocção e caracterizando-se os mecanismos de transferência de calor predominantes e, ainda, determinar a condutividade e difusividade térmica da massa da pizza durante a cocção. Para a realização deste estudo, foi construído o protótipo de um forno, consistindo em uma câmara retangular (50 cm x 50 cm x 25 cm), cujas superfícies têm suas temperaturas controladas independentemente, com um ventilador acoplado na sua parte superior. O impacto das diferentes configurações de um forno na qualidade da pizza foi estudado com base em 4 fatores: presença ou ausência de calor transferido por radiação pelas superfícies laterais do forno, presença ou ausência de calor transferido por radiação pela superfície superior, presença ou não de convecção forçada e dois materiais utilizados na base do forno, alumínio e pedra. Os parâmetros de qualidade avaliados para a pizza foram: textura da borda, cor, fator de segurança em processos de aquecimento de alimentos e perda de água. As superfícies do forno foram fixadas a temperatura de 250°C e o tempo de cocção, 10 minutos. O ventilador, quando ligado, foi fixado a uma frequência de 35 Hz. A convecção forçada contribuiu fortemente para o aumento de todos os parâmetros de qualidade avaliados: a cor, avaliada através de uma escala construída propriamente para este fim, teve um aumento 92%. A textura aumentou em 37%, a perda de água, em 98% e o fator de segurança, em 934%, em relação àquelas pizzas assadas sem convecção forçada. A radiação pelo teto e a radiação pelas paredes laterais tiveram efeitos estatisticamente iguais ($\alpha=0,05$) tanto para a textura da borda, quanto para a perda de água e para o fator de segurança. O tipo de forma utilizada teve influência apenas no fator de segurança,

aumentando seu valor em 8%. Baseado nesses resultados definiu-se a seguinte configuração para o forno: radiação proveniente de todas as superfícies, ventilação no interior da câmara e uso de pedra na base do forno, em contato com a pizza. Com esta configuração foram ainda estudados três níveis para a frequência do ventilador (5, 20 e 35 Hz), para a temperatura (150, 250 e 350°C), e para o tempo de cocção (3, 5 e 10 minutos). As pizzas assadas a 250°C, por 5 minutos e com o ventilador a 20 Hz e as assadas a 250°C, por 10 minutos e com ventilador a 5 Hz foram as que apresentaram melhores resultados em relação a todos os parâmetros de qualidade. O mecanismo de transferência de calor predominante sobre estas condições foi a radiação, seguido da convecção e da condução. A difusividade térmica da massa da pizza foi determinada pelas curvas de penetração de calor, para diferentes tempos de cocção obtendo-se um valor médio de $2,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para a massa assada até o terceiro minuto e um valor médio de $3,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para as assadas entre o terceiro e quinto minuto. A condutividade térmica, determinada pelo método da sonda linear de aquecimento foi de $0,092 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{C}$ para massas assadas em até cinco minutos.

Palavras chave: forno de cocção, processamento térmico de alimentos, qualidade de alimentos, mecanismos de transferência de calor, propriedades termofísicas.

ABSTRACT

With technological energy reduction development, different types of economic and ecological ovens, which replace the wood and electric ballast as energy sources, are being released to the market. The food industry aims for the development of better quality products (ovens), as well as the establishment of more efficient and better controlled processes (cooking). The understanding of the impact of these technologies in the cooking process and food quality is directly associated with their sensory properties (texture, color, flavor). Moreover, for the design of cooking ovens, the knowledge of some thermophysical properties of food is needed. In this context, the main objective of this study is to evaluate the impact of different configurations of an oven in the quality of pizza, by setting up the best conditions for their cooking and by characterizing the predominant mechanisms of heat transfer. Therefore, it is necessary to determine the thermal conductivity and diffusivity properties of pizza dough, during the cooking process. For this study, an oven prototype was built, consisting of a rectangular chamber (50 cm x 50 cm x 25 cm), where internal plates were independently temperature controlled. A fan was coupled to the top region of the oven. The impact of different oven configurations on the pizza's quality was studied on the basis of four factors: the presence or absence of heat transferred by radiation from the surfaces of the oven, presence or absence of heat transferred by radiation from upper surface, presence or absence of forced convection and two materials, used in the oven bases (cooking tins): aluminum and stone. The quality standards evaluated for the pizza were: the edge texture, color, factor of safety in the food heating process and water loss. The temperature of the oven's surfaces were set on 250°C and the time of cooking at 10 minutes. The electrical fan frequency, when on, was set at 35 Hz. It was observed that the forced convection contributed heavily to the improvement of all quality parameters evaluated. The color, measured by a scale built specifically for this purpose, increased by 92% when compared to pizzas baked without forced convection. The edge texture increased by 37%, the water loss by 98% and the safety factor by 934%. Statistically, the radiation provided by the upper and side surfaces presented the same influence over the edge texture, water loss and safety factor. The material of the baking tin presented influence only over the safety factor, increasing it by 8%. Based on these results, the following configuration was set as the best one: radiation from all surfaces, ventilation inside the chamber and use of stone as the material of the base of the furnace, in contact with the pizza. With this configuration, three levels of the electrical fan frequency was studied: 5, 20 and 35 Hz; three levels of temperature were adopted: 150, 250 and 350°C and three different cooking times were analyzed: 3, 5 and 10 minutes. The

pizzas baked at 250°C for 5 minutes with the fan at 20 Hz and the ones baked at 250°C for 10 minutes with the fan at 5 Hz presented the best results for all quality parameters. The mechanism of heat transfer predominant on these conditions was radiation, followed by convection and conduction. The pizza's dough thermal diffusivity was determined by the curves of heat penetration for different baking times, resulting in an average of $2,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ until the third minute of baking and $3,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ from the third to the fifth minute. Thermal conductivity, determined by the method of linear heating probe, resulted in an average of $0,092 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ until the fifth minute of baking.

Keywords: baking oven, heat processing of food, food quality, mechanisms of heat transfer, thermophysicals properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS PÃES ACHATADOS (FONTE: QAROONI, 1996).....	7
FIGURA 2.2 – DIFERENÇA ENTRE O PROCESSAMENTO DE PÃES ACHATADOS DE ÚNICA CAMADA E DE DUPLA CAMADA. (FONTE: QUARRONI, 1996).....	9
FIGURA 2.3 – MAPA DE COCÇÃO INDICANDO OS ESTÁGIOS DA COCÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE COCÇÃO E DA TEMPERATURA DA MASSA (FONTE: SWORTFINGER (1968), APUD PATEL; WANISKA;SEETHARAMAN, 2005).	10
FIGURA 2.4 – (A) CURVA DE RESISTÊNCIA TÉRMICA (B) CURVA DE DESTRUIÇÃO TÉRMICA.....	21
FIGURA 2.5 – (A) PLACA PLANA INFINITA E (B) CILINDRO INFINITO.	31
FIGURA 2.6 – CILINDRO FINITO FORMADO PELA JUNÇÃO DA PLACA PLANA INFINITA E DE UM CILINDRO INFINITO.	33
FIGURA 2.7 – APARATO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA, DICKERSON (1965).	34
FIGURA 3.1 – ESQUEMA DAS ETAPAS REALIZADAS PARA A DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE COCÇÃO DA PIZZA, DA QUANTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA PIZZA.	51
FIGURA 3.2 – VISTA DAS RESISTÊNCIAS FIXADAS NO FORNO.....	53
FIGURA 3.3 – FORMA DE PEDRA UTILIZADA NA COCÇÃO.....	53
FIGURA 3.4 – VISTA DO VENTILADOR ACOPLADO AO FORNO.....	53
FIGURA 3.5 – ISOLAMENTO TÉRMICO DO FORNO.	53
FIGURA 3.6 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FUNCIONAMENTO DE UMA CAIXA ISOTÉRMICA.....	55
FIGURA 3.7 – FICHA MODELO PARA AVALIAÇÃO SENSORIAL DA COR PELO TESTE DE ACEITAÇÃO, UTILIZANDO-SE ESCALA HEDÔNICA DE 5 PONTOS.	57
FIGURA 3.8 – ESQUEMA DA DETERMINAÇÃO DA ESCALA PADRÃO DE COR.....	58
FIGURA 3.9 – SISTEMA DE OBTENÇÃO DAS IMAGENS.	59
FIGURA 3.10 – FICHA MODELO PARA AVALIAÇÃO SENSORIAL DA TEXTURA DA CROSTA PELO TESTE DE ACEITAÇÃO, UTILIZANDO-SE ESCALA-DO-IDEAL DE 5 PONTOS.	60
FIGURA 3.11 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA PIZZA.	61
FIGURA 3.12 – ESQUEMA DO ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DO FORNO NA QUALIDADE DA PIZZA.....	63

FIGURA 3.13 – ESQUEMA DO ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO FORNO EM RELAÇÃO À QUALIDADE DA PIZZA.....	64
FIGURA 3.14 – MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENVOLVIDOS NO AQUECIMENTO DO BLOCO.	66
FIGURA 3.15 – POSICIONAMENTO DOS TERMOPARES NO INTERIOR DO BLOCO: (A) VISTA SUPERIOR, (B) VISTA LATERAL E (C) ESQUEMA DO POSICIONAMENTO DO BLOCO NO INTERIOR DO FORNO.....	78
FIGURA 3.16 – ESQUEMA DA POSIÇÃO DO BLOCO EM CASA ENSAIO.....	79
FIGURA 3.17 – POSIÇÃO DO BLOCO NO INTERIOR DO FORNO (A) E POSIÇÃO DOS TERMOPARES NO INTERIOR DO BLOCO (B).	80
FIGURA 3.18 – APARATO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA AMOSTRA.	83
FIGURA 3.19 – APARATO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA AMOSTRA.	84
FIGURA 4.1 – DISTRIBUIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS RELATIVAS REFERENTES AOS ATRIBUTOS DE QUALIDADE DA PIZZA.....	87
FIGURA 4.2 – ESCALA PADRÃO DE COR UTILIZADA PARA A AVALIAÇÃO DA COR DE PIZZAS.	91
FIGURA 4.4 – TEMPERATURA DO FORNO, INCLUINDO PAREDES E CÂMARA, EM FUNÇÃO DO TEMPO, PARA O TESTE 1.	93
FIGURA 4.5 – TEMPERATURA DO FORNO, INCLUINDO PAREDES E CÂMARA, EM FUNÇÃO DO TEMPO, PARA O TESTE 2.	94
FIGURA 4.6 – TEMPERATURA DO FORNO, INCLUINDO PAREDES E CÂMARA, EM FUNÇÃO DO TEMPO, PARA O TESTE 3.	95
FIGURA 4.7 – TEMPERATURA DO FORNO, INCLUINDO PAREDES E CÂMARA, EM FUNÇÃO DO TEMPO, PARA O TESTE 4.	95
FIGURA 4.8 – TEMPERATURA DO FORNO, INCLUINDO PAREDES E CÂMARA, EM FUNÇÃO DO TEMPO, PARA O TESTE 5.	96
FIGURA 4.9 – TEMPERATURA DO FORNO, INCLUINDO PAREDES E CÂMARA, EM FUNÇÃO DO TEMPO, PARA O TESTE 9.	96
FIGURA 4.10 – GRÁFICO DA PROBABILIDADE NORMAL PARA OS EFEITOS PADRONIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA COR DA PIZZA.	99
FIGURA 4.11 – IMAGENS OBTIDAS DE PIZZAS ASSADAS NO PROTÓTIPO DO FORNO, A 250°C POR 10 MINUTOS, SEM CONVECÇÃO FORÇADA E COM CONVECÇÃO FORÇADA.	100
FIGURA 4.12 – GRÁFICO DA PROBABILIDADE NORMAL DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA TEXTURA DA BORDA.	102
FIGURA 4.13 – GRÁFICO DA PROBABILIDADE NORMAL DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA PERDA DE ÁGUA DA PIZZA.....	103

FIGURA 4.14 – GRÁFICO CÚBICO DA RADIAÇÃO PELO TETO, RADIAÇÃO PELAS PAREDES E CONVECÇÃO FORÇADA, PARA A TEXTURA DA BORDA.	105
FIGURA 4.15 – GRÁFICO CÚBICO DA RADIAÇÃO PELO TETO, RADIAÇÃO PELAS PAREDES E CONVECÇÃO FORÇADA, PARA A PERDA DE ÁGUA DURANTE A COCÇÃO.	105
FIGURA 4.16 – GRÁFICO DA PROBABILIDADE DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA O NÚMERO DE REDUÇÕES DECIMAIS OCASIONADOS DURANTE A COCÇÃO DA PIZZA.	108
FIGURA 4.17 – GRÁFICO CÚBICO DA RADIAÇÃO PELO TETO, RADIAÇÃO PELAS PAREDES E CONVECÇÃO FORÇADA, PARA O NÚMERO DE REDUÇÕES DECIMAIS.	109
FIGURA 4.18 – CURVAS DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA DIFERENTES POSIÇÕES DO BLOCO DENTRO DO FORNO E DIFERENTES POSIÇÕES DO TERMOPAR DENTRO DO BLOCO DE ALUMÍNIO.	115
FIGURA 4.19 – IMAGENS DOS BLOCOS UTILIZADOS NOS TESTES PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.	119
FIGURA 4.20 – GRÁFICO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS BLOCOS PRETO, POLIDO E POLIDO MAIS MATERIAL ISOLANTE. RÉPLICA 1.	120
FIGURA 4.21 – GRÁFICO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS BLOCOS PRETO, POLIDO E POLIDO MAIS MATERIAL ISOLANTE. RÉPLICA 2.	120
FIGURA 4.22 – TEMPERATURA DO BLOCO E DO FORNO E LOGARITMO NATURAL DA TEMPERATURA DIMENSIONAL DO BLOCO EM FUNÇÃO DO TEMPO.	121
FIGURA 4.23 – COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO PARA O BLOCO DURANTE O AQUECIMENTO.	123
FIGURA 4.24 – TEMPERATURA DO BLOCO E DO FORNO E LOGARITMO NATURAL DA TEMPERATURA ADIMENSIONAL DOS BLOCOS POLIDO E POLIDO COM ISOLANTE EM FUNÇÃO DO TEMPO.	125
FIGURA 4.25 – COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO PARA O BLOCO DURANTE O AQUECIMENTO.	126
FIGURA 4.26 – TEMPERATURA DO BLOCO E DO FORNO E LOGARITMO NATURAL DA TEMPERATURA ADIMENSIONAL DOS BLOCOS PRETO E POLIDO EM FUNÇÃO DO TEMPO.	128
FIGURA 4.27 – COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO PARA O BLOCO DURANTE O AQUECIMENTO, CALCULADOS PELA TÉCNICA DOS BLOCOS.	129
FIGURA 4.28 – COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO PARA O BLOCO DURANTE O AQUECIMENTO, CALCULADOS UTILIZANDO-SE A TEMPERATURA DAS SUPERFÍCIES... ..	130
FIGURA 4.29 – (A) IMAGENS TERMOGRÁFICAS DO INTERIOR DO FORNO, OBTIDAS NO INÍCIO DE SEU AQUECIMENTO (ESQUERDA) E (B) NO REGIME PERMANENTE.	131
FIGURA 4.30 – CALOR TRANSFERIDO POR RADIAÇÃO AO BLOCO.	132
FIGURA 4.31 – IMAGEM TERMOGRÁFICA DA VISTA FRONTAL DO FORNO FECHADO.	132
FIGURA 4.32 – (A) MASSA CORTADA EM CÍRCULOS E (B) DISPOSIÇÃO DAS CAMADAS DE MASSA NO INTERIOR DO TUBO.	135

FIGURA 4.33 – IMAGENS DO APARATO EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA.	136
FIGURA 4.34 – GRÁFICO DA TEMPERATURA DO BANHO E DO CENTRO GEOMÉTRICO DA AMOSTRA EM FUNÇÃO DO TEMPO.	136
FIGURA 4.35 – GRÁFICO DA TEMPERATURA ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE TESTE... ..	137
FIGURA 4.36 – IMAGENS DO APARATO EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA MASSA DE PIZZA.	139
FIGURA 4.37 – GRÁFICO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO DA SONDA LINEAR DE AQUECIMENTO, DURANTE A CALIBRAÇÃO COM GLICERINA P.A.....	141
FIGURA 4.38 – (A) ESQUEMA DAS CAMADAS DE MASSA DE PIZZA, INTERCALADAS COM AR NO INTERIOR DO TUBO, (B) ASSOCIAÇÃO EM PARALELO DAS RESISTÊNCIAS TÉRMICAS.	144
FIGURA 4.39 – (A) NÚMERO DE CAMADAS DE MASSA DE PIZZA PARA O PREENCHIMENTO DO TUBO, (B) CORTE LONGITUDINAL PARA DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DAS CAMADAS DE AR.....	145

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – PADRÃO MICROBIOLÓGICO PARA A MASSA DE PIZZA	18
TABELA 2.2 – VALORES D E Z PARA OS MICRORGANISMOS CITADOS NA TABELA 2.1.	21
TABELA 2.3 – COMPARAÇÃO ENTRE O ERRO DE TRUNCAMENTO DADO POR ξ_{TR} E ξ_{β}	45
TABELA 3.1 – FATORES ESTUDADOS NA 1ª ETAPA E SEUS NÍVEIS.....	62
TABELA 3.2 – FATORES ESTUDADOS NA 2ª ETAPA E SEUS NÍVEIS.....	64
TABELA 3.3 – COMBINAÇÃO DOS FATORES R_B , Θ_B , R_F E Θ_F PARA O PLANEJAMENTO FATORIAL FRACIONADO 2_{IV}^{4-1} E POSIÇÃO DO BLOCO E DO TERMOPAR CORRESPONDENTES.....	80
TABELA 3.4 – COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DA MASSA DE PIZZA.	82
TABELA 4.1 – CÁLCULO DAS MÉDIAS, ANÁLISE DE VARIÂNCIA, COM NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 5%, PARA OS DADOS OBTIDOS NO ESTUDO DA SELEÇÃO DOS ATRIBUTOS DE QUALIDADE DA PIZZA.	87
TABELA 4.2 - CÁLCULO DAS MÉDIAS E RESULTADO DO TESTE DE TUKEY, COM NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 5%, DOS DADOS OBTIDOS PARA A CONSTRUÇÃO DA ESCALA PADRÃO DE COR.	89
TABELA 4.3 – FREQUÊNCIA RELATIVA DAS NOTAS ATRIBUÍDAS A CADA UMA DAS PIZZAS.....	90
TABELA 4.4 – PLANEJAMENTO FATORIAL COMPLETO PARA O ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DO FORNO NA QUALIDADE DA PIZZA.	92
TABELA 4.5– POTÊNCIAS TOTAIS PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DO FORNO.	93
TABELA 4.6– CÁLCULO DAS MÉDIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS DADOS OBTIDOS NA ANÁLISE SENSORIAL PARA A AVALIAÇÃO DA COR DA PIZZA.	98
TABELA 4.7 – CÁLCULO DAS MÉDIAS PARA OS DADOS OBTIDOS NA ANÁLISE SENSORIAL PARA A AVALIAÇÃO DA TEXTURA DA BORDA.	101
TABELA 4.8 – CÁLCULO DAS MÉDIAS DOS DADOS OBTIDOS PARA A AVALIAÇÃO DA PERDA DE ÁGUA PELA PIZZA, DURANTE A COCÇÃO.	103
TABELA 4.9 – MÉDIAS DOS $F_{PROCESSO}$ E DO NÚMERO DE REDUÇÕES DECIMAIS (τ) PARA O <i>BACILLUS CEREUS</i> , A $T_{REF} = 90^{\circ}C$	107
TABELA 4.10 – COMBINAÇÃO DOS FATORES ESTUDADOS NA ETAPA IB.....	112
TABELA 4.11 – MÉDIA DOS VALORES OBTIDOS PARA A COR, TEXTURA DA BORDA, NÚMERO DE REDUÇÕES DECIMAIS E PERDA DE ÁGUA OCACIONADA PELO PROCESSO DE COCÇÃO.....	113
TABELA 4.12 – COMBINAÇÃO DOS FATORES R_B , Θ_B , R_F E Θ_F PARA O PLANEJAMENTO FATORIAL FRACIONADO 2_{IV}^{4-1} E POSIÇÃO DO BLOCO E DO TERMOPAR CORRESPONDENTES.	115

TABELA 4.13 – TEMPERATURAS EM DIFERENTES TEMPOS PARA AS CURVAS DA FIGURA 4.18...	116
TABELA 4.14 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS DADOS DA TABELA 4.13.	116
TABELA 4.15 – COEFICIENTES DO POLINÔMIO DE 5º GRAU PARA AS CURVAS DA FIGURA 4.18...	117
TABELA 4.16 – VALORES-P DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS DADOS DA TABELA 4.15.	117
TABELA 4.17 – ÁREA ABAIXO DAS CURVAS DA FIGURA 4.18.....	118
TABELA 4.18 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS DADOS DA TABELA 4.17.	118
TABELA 4.19 – COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR OBTIDOS.....	134
TABELA 4.20 – VALORES MÉDIOS DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA MASSA DE PIZZA E PERDA DE ÁGUA DURANTE A COCÇÃO.	137
TABELA 4.21 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS DADOS DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA MASSA DE PIZZA.	138
TABELA 4.22 – VALORES MÉDIOS DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA MASSA DE PIZZA.....	142
TABELA 4.23 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS DADOS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA MASSA DE PIZZA.	142

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	[m ²]
a	Razão entre o comprimento da sonda e o diâmetro externo	adimensional
a_w	Atividade de água	adimensional
b	Quatro vezes a espessura da parede da sonda dividido pelo diâmetro externo ($4e_{ps}/d_{sonda}$)	adimensional
Bi	Número de Biot	adimensional
c	Razão entre a condutividade térmica da sonda e a condutividade térmica da amostra	adimensional
Ce	Constante de Euler	0,57721
c_p	Calor específico à pressão constante	[J/kgK]
d	Distância entre o fio aquecedor e o ponto de interesse	[m]
d	Razão entre a razão da condutividade e difusividade térmica da sonda (k_{sonda}/α_{sonda}) e a razão da condutividade e difusividade térmica da amostra ($k_{amostra}/\alpha_{amostra}$)	adimensional
D	Tempo de redução decimal	[s]
e	Número de Euler	2,71828
E	Emitância total; energia	[W/m ²] [W]
E_i	Função integral exponencial de primeira ordem	
F	Nível de destruição térmica; letalidade integral	[s]
F₀	Teste F da análise de variância	adimensional
f_h	Taxa de aquecimento	[s]
F_{i-j}	Fator de forma da superfície i para a superfície j	adimensional
Fo	Número de Fourier	adimensional
G	Irradiância total	[W/m ²]
gl	Graus de liberdade	

h	Coeficiente de transferência de calor	[W/m ² K]
H	Taxa de aquecimento constante; altura	[K/s] [m]
H_0	Hipótese nula	
H_1	Hipótese alternativa	
i	Corrente elétrica	[A]
J	Radiosidade total	[W/m ²]
$J_0; J_1$	Funções de Bessel de primeiro tipo e ordem 0 e 1	
k	Condutividade térmica	[W/mK]
L	Índice letal; comprimento	Adimensional [m]
L_c	Comprimento característico	[m]
m	Massa	[kg]
n	Número de microrganismos	adimensional
N	Número de superfícies do forno	adimensional
P	Potência	[W]
q	Taxa de transferência de calor	[W]
Q_{sonda}	Calor dissipado pela sonda linear de aquecimento	[W/m]
q_α	amplitude estudentizada	
r	Coordenada radial	
R	Raio	[m]
R^2	Coeficiente de determinação	
$R_{contato}^*$	Resistência térmica de contato	[°C/W]
R_t	Resistência térmica	[°C/W]
SQE	Soma quadrática devido ao erro	
SQR	Soma quadrática devido ao modelo	
SQT	Soma quadrática total	
T	Temperatura	[°C],[K]

t	tempo	[s]
T_0	Teste T da análise de variância	adimensional
U	Tensão	[V]
w	Conteúdo de água	[kg _{água} /kg _{massa seca}]
x	Designação geral para uma grandeza qualquer	
x,y,z	Coordenadas cartesianas	[m]
Z_m	Constante de resistência térmica do microrganismo	[°C]

Símbolos gregos

$\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial z}, \frac{\partial T}{\partial r}$	Gradientes de temperatura ao longo das direções x,z e r, respectivamente	[°C/m]
$\frac{\partial T}{\partial t}$	Gradiente de temperatura ao longo do tempo	[°C/s]
α	Difusividade térmica Absortividade Nível de significância estatístico	[m ² /s] adimensional adimensional
β	Parâmetro de erro; coeficientes de regressão; Probabilidade erro tipo II	adimensional
γ	Número de reduções decimais	adimensional
Δ_α	Diferença mínima significativa para o Teste de Tukey	
ϵ	Emissividade, erro	adimensional
η	Fator adimensional	
θ	Temperatura adimensional; ângulo	adimensional [°]
μ_m	Raízes positivas da equação transcendental $\mu_m \tan \mu_m = Bi$	
μ_n	Raízes positivas da equação transcendental $\mu_n \frac{J_1(\mu_n)}{J_0(\mu_n)} = Bi$	
$\xi(\beta^2)$	Erro de truncamento	
π	pi	3,141593
ρ	Densidade refletividade	[kg/m ³]; adimensional
σ	Constante de Stefan-Boltzmann Desvio-padrão	$5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m ² K ⁴]

Subscritos e sobrescritos

0	Início
∞	Ambiente
a,p, k, n, j	Designação geral para número de fatores, superfícies, temperaturas, coeficientes, amostras, áreas etc.
ac	Acúmulo
amostra	Amostra contida no recipiente cilíndrico
ar	Ar no interior do forno
bloco,B	Bloco de alumínio
c	Centro
cil	Cilindro contendo a amostra
cond	Condução
conv	Convecção
entra	Entrando no volume de controle
eq	Equivalente
f	Final
fio aquecedor	Fio aquecedor introduzido na sonda linear de aquecimento
fio-sonda	Fio aquecedor inserido na sonda
forma, F	Forma utilizada na cocção da pizza
polido	Bloco polido
preto	Bloco preto
processo	Processo de cocção da pizza
R	Raio do cilindro; parede do cilindro
rad	Radiação
ref	Referência
s	Superfície do forno
sai	Saindo do volume de controle
sonda	Sonda linear de aquecimento
TR	Truncamento
w	Água

Expoentes

*	Modificado
-	Condição média
\wedge	Valor predito, estimador mínimo quadrado
.	Taxa

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT	VIII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	X
LISTA DE TABELAS	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS	XVI
CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	4
1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	5
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	6
CAPÍTULO II	7
REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1 PIZZA.....	7
2.2 FORNOS.....	11
2.3 REQUISITOS DE QUALIDADE.....	16
2.3.1 <i>Requisitos de Segurança</i>	17
2.3.2 <i>Requisitos Sensoriais</i>	23
2.3.2.1 <i>Análise Sensorial</i>	25
2.3.2.1.1 <i>Métodos Sensoriais</i>	26
2.4 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS.....	28
2.4.1 <i>Difusividade térmica</i>	29
2.4.1.1 <i>Estimação dos mínimos quadrados</i>	31
2.4.1.2 <i>Uso de curvas de penetração de calor</i>	33
2.4.1.3 <i>Uso de soluções analíticas</i>	37
2.4.1.4 <i>Uso das cartas tempo-temperatura</i>	37
2.4.2 <i>Condutividade térmica</i>	38
2.4.2.1 <i>Método da sonda linear de aquecimento</i>	41
2.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	50

CAPÍTULO III	51
MATERIAL E MÉTODOS	51
3.1 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO FORNO.....	52
3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURAS	54
3.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA PIZZA	55
3.3.1 <i>Requisito de segurança microbiológica</i>	55
3.3.2 <i>Requisitos de qualidade sensorial</i>	56
3.3.2.1 Avaliação da cor	56
3.3.2.1.1 Construção da escala padrão de cor: limites de aceitação e rejeição	56
3.3.2.1.2 Obtenção de imagens.....	58
3.3.2.1.3 Determinação da cor	59
3.3.2.2 Avaliação da textura da borda	59
3.3.2.3 Avaliação de perda de água durante a cocção.....	60
3.4 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE COCÇÃO DA PIZZA	62
3.4.1 <i>Etapa IA – Estudo sobre a influência da configuração do forno na qualidade da pizza</i>	62
3.4.2 <i>Etapa IB – Determinação das condições de operação do forno</i>	63
3.5 QUANTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	64
3.5.1 <i>Aplicação da técnica dos blocos para cavidades radiativas</i>	66
3.5.1.1 Validade do método da capacitância global	77
3.6 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA MASSA DE PIZZA.....	82
3.6.1 <i>Difusividade térmica</i>	82
3.6.2 <i>Condutividade térmica</i>	84
3.6.2.1 Calibração da sonda	85
CAPÍTULO IV	86
RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
4.1 QUALIDADE SENSORIAL	86
4.1.1 <i>Definição dos atributos de qualidade sensorial estudados</i>	86
4.1.2 <i>Construção da escala padrão de cor</i>	89
4.2 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE COCÇÃO DA PIZZA	92
4.2.1 <i>Etapa IA – Estudo sobre a influência da configuração do forno na qualidade da pizza</i>	92
4.2.1.1 Avaliação da cor	97
4.2.1.2 Textura da borda e perda de água.....	101
4.2.1.3 Número de reduções decimais e letalidade integral do processo	106
4.2.1.4 Conclusão	110

4.2.2 Etapa IB – Determinação das condições de operação do forno.....	111
4.2.2.1 Conclusão	114
4.3 QUANTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	114
4.3.1 Validade do método da capacitância global.....	114
4.3.1.1 Conclusão	118
4.3.2 Medida experimental dos coeficientes de transferência de calor	119
4.3.2.1 Conclusão	133
4.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA MASSA DA PIZZA.....	134
4.4.1 Difusividade térmica	135
4.4.2 Condutividade térmica.....	139
4.4.2.1 Calibração da sonda	140
4.4.2.2 Resistência térmica da camada de ar contida entre as camadas de massa.....	143
4.4.2.3 Cálculo do número de Biot para a massa da pizza	146
4.5 ANÁLISE DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS	146
CAPÍTULO V.....	147
CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	147
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	150
ANEXO – A	159
APÊNDICES.....	160
APÊNDICE – A: PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	161
APÊNDICE – B: DISPOSIÇÃO DOS TERMOPARES NO INTERIOR DO FORNO.....	174
APÊNDICE – C: DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE FORMA ENTRE AS SUPERFÍCIES INTERNAS DO FORNO E A PIZZA	176
APÊNDICE – D: DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE COCÇÃO DA PIZZA	179
APÊNDICE D1 – DEFINIÇÃO DOS ATRIBUTOS DE QUALIDADE SENSORIAL ESTUDADOS E CONSTRUÇÃO DA ESCALA PADRÃO DE COR.....	180
APÊNDICE D2 – TEMPERATURA DO FORNO E DA MASSA DA PIZZA SOB AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DO FORNO TESTADAS.....	185
APÊNDICE D3 – ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DO FORNO NA QUALIDADE DA PIZZA: QUALIDADE SENSORIAL E REQUISITOS DE SEGURANÇA.....	196
APÊNDICE D4 – DETERMINAÇÃO DAS MELHORES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO FORNO PARA A COCÇÃO DA PIZZA	206
APÊNDICE – E: QUANTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	214
APÊNDICE – F: DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA PIZZA	216
APÊNDICE F1 – DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA MASSA DE PIZZA	216
APÊNDICE F2 – DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA PIZZA	220
APÊNDICE – G: ANÁLISE DE INCERTEZAS.....	230

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A pizza é um produto que ganhou espaço na preferência do consumidor. Segundo a Associação Brasileira de Gastronomia, Hospitalidade e Turismo, São Paulo é o segundo maior consumidor de pizzas do mundo, perdendo apenas para Nova Iorque. Atualmente, existem na capital paulista quase 6 mil pizzarias, que fornecem cerca de 43 milhões de pizzas por mês à cidade. Algumas das razões do crescimento de mercado e conseqüente aumento da produção industrial são custo relativamente baixo do produto e a facilidade de preparo para o consumo. No entanto, a popularização da pizza, em relação a outros produtos de forno, é relativamente recente e a qualidade de sua massa continua sendo uma área pouco pesquisada. (WANG et al., 2005).

A tecnologia associada à cocção de pizzas é pouco conhecida. Porém, alguns fenômenos podem ser esclarecidos por analogia à cocção de pães, uma vez que os ingredientes básicos da massa destes dois produtos são praticamente os mesmos. Os fatores que podem influenciar na qualidade da pizza, durante a cocção, são baseados em conhecimentos empíricos e em estudos feitos com produtos similares. Apesar de muitos trabalhos envolvendo formulações alternativas, recheios mais adequados ao armazenamento, embalagens, entre outros, pode-se dizer que são poucos os índices objetivos de qualidade disponíveis na literatura ou na legislação especificamente para este tipo de produto. (PINHO; MACHADO; FURLONG, 2001).

A pizza é um alimento heterogêneo, cujas condições ideais de cocção dependem tanto de fatores inerentes ao alimento (composição, propriedades físicas, tamanho, forma), quanto de fatores relacionados ao forno (tipo de forno, temperatura). A massa da pizza constitui uma fração significativa do produto e aparência, sabor e textura são fatores importantes para sua identificação e aceitação pelo consumidor.

No processo de cocção de massas, modificações na forma com que o calor é distribuído dentro da câmara podem interferir na qualidade e, conseqüentemente, na aceitabilidade do produto.

Na cocção de pães, por exemplo, sabe-se que a convecção forçada no interior da câmara tem fundamental importância na qualidade do produto. É essa convecção que distribuirá melhor o vapor de água injetado na câmara, responsável pela formação da crosta e crescimento adequado dos pães. No caso de biscoitos, a cocção deve ser a baixas temperaturas, envolvendo basicamente radiação e condução, e por tempo prolongado,

garantindo tempo suficiente para a gelatinização parcial do amido da farinha e a secagem dos biscoitos. Já o churrasco é assado basicamente por radiação, proveniente das brasas do carvão.

Para que uma câmara de cocção possa ser projetada com maior eficiência, é necessário o conhecimento dos processos físicos e químicos que envolvem a cocção do alimento, estabelecendo-se o tempo e temperatura ideal para se obter um produto final de qualidade.

Depois da própria pizza, é o forno o principal elemento em uma pizzaria. Inúmeras pizzarias utilizam, ainda hoje, fornos a lenha; outras, o substituíram pelo forno de lastro elétrico. No entanto, com o desenvolvimento energético, vêm surgindo no mercado diferentes tipos de fornos. Em geral, o propósito desses fornos é a economia de energia e o aumento da produtividade, mantendo-se, contudo, a qualidade do produto. A qualidade de produtos de panificação é geralmente avaliada pela cor, textura e sabor. Em termos gerais, a cocção de um alimento é a conversão da sua forma crua em produto cozido, o qual é alcançado com o emprego de calor. Durante a cocção, a massa passa por diversas mudanças a fim de se obter um produto de qualidade desejada, e é essa qualidade que limita a aplicação de novas tecnologias.

Um exemplo bem claro é a cocção de produtos de panificação em forno de microondas. Apesar do aquecimento por microondas ser um processo energeticamente e economicamente eficiente, os produtos apresentam textura inaceitável, com a parte externa do produto firme e a parte interna excessivamente dura, além de pequeno volume, perda excessiva de água, má formação da crosta e da coloração, principal responsável pelo sabor do produto. (SUMNU; DEMIREKLER; SAHIN, 2004).

O forno *jet impingement*, cuja tecnologia consiste no uso de jatos de ar quente direcionados sobre as superfícies do produto, tem sido usado com sucesso na cocção de alimentos, especialmente pizza, *tortilla* e vários pães do tipo *flat bread*. No entanto, em produtos de tamanho grande o uso dessa tecnologia não apresentou bons resultados. Inovações tecnológicas, como o uso de forno *jet impingement* ou forno híbrido, combinando *impingement* e tecnologia de aquecimento por microondas, têm sido usadas com eficiência no setor alimentício. (WÂHLBY; SKJÖLDEBRAND; JUNKER, 2000; PATEL; WANISKA; SEETHARAMAN, 2005).

A aplicação destas tecnologias assiste a indústria alimentícia no desenvolvimento de produtos de melhor qualidade, bem como, no estabelecimento de processos mais eficientes e no melhor controle dos processos existentes. No entanto, o sucesso na aplicação de novas tecnologias para a cocção de produtos de panificação está diretamente ligado ao entendimento do processo de cocção convencional e as mudanças ocorridas na

massa durante a cocção, além do conhecimento dos mecanismos de transferência de calor nestes fornos.

Numerosos estudos têm investigado o desenvolvimento da estrutura de produtos panificáveis. Poucos, no entanto, têm investigado o efeito dos diferentes processos de cocção, isto é, diferentes perfis de temperatura, formas e taxas de transferência de calor para o produto, associando-o às mudanças na qualidade e na aceitação do produto.

Assim, o entendimento do impacto das diferentes condições de cocção sobre as transformações ocorridas no produto, associadas principalmente às suas propriedades sensoriais (textura, cor, sabor), torna-se uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento de novas tecnologias nesse setor.

A determinação das condições térmicas de cocção da pizza foi, então, motivada pelo interesse em se desenvolver uma alternativa moderna para a substituição dos atuais fornos de pizza a lenha e elétricos, com o uso da tecnologia de termossifões, que atenda a qualidade do produto final.

A energia elétrica, uma das principais fontes energéticas utilizadas em fornos de cocção de pizzas, tem tornado-se escassa e cara. Já a lenha, apesar de barata, apresenta grande impacto ambiental proveniente do corte e da queima da madeira, o que tem motivado o governo para o desenvolvimento e adoção de políticas ambientalmente corretas.

Na intenção de se tornarem mais competitivas, as empresas buscam, também, por processos mais eficientes e aumento da produtividade, considerando, sempre que possível, fontes energéticas de menor custo. O LABTUCAL tem realizado inúmeras pesquisas visando à otimização térmica de equipamentos empregados na cocção de alimentos. Neste sentido, o uso de termossifões apresenta-se como uma solução térmica neste setor, permitindo a separação física, mas não térmica, das câmaras de cocção e combustão.

A tecnologia de termossifões e tubos de calor, aplicada a fornos de cocção de pães vem sendo desenvolvida pelo Laboratório de Tubos de Calor (LABTUCAL/LEPTEN) desde 1997. O LABTUCAL, nascido a partir do Núcleo de Controle Térmico de Satélites do Laboratório de Energia Solar – LABSOLAR/NCTS – realiza pesquisas na área espacial e industrial desenvolvendo tubos de calor, termossifões, câmaras de vapor e demais dispositivos de transferência de calor para atender as mais variadas aplicações. No setor alimentício, equipamentos com esta tecnologia já estão inclusive disponíveis no mercado graças a parcerias entre o LABTUCAL e indústrias do setor de fornos de cocção.

Termossifões são dispositivos de transporte de calor de grande eficiência, pois utilizam o calor latente de vaporização e condensação do fluido de trabalho, proporcionando uma temperatura uniforme no forno e um rápido aquecimento, devido a sua excelente condutividade térmica. A vantagem desse dispositivo é a possibilidade de transportar

grandes quantidades de calor através de distâncias consideráveis, quando o mesmo é submetido a um fluxo de calor, sem necessidade de nenhuma fonte adicional de energia. Além disso, a flexibilidade geométrica, a simplicidade de construção e a capacidade de controle dessa transferência de calor contribuem para as mais diversas aplicações dos termossifões. Estudos teóricos, assim como os experimentais, realizados em protótipos mostraram que os fornos adaptados com termossifões apresentam performances térmicas superiores aos demais encontrados no mercado, assim como uma melhor distribuição de temperaturas, gerando um produto de qualidade mais homogênea.

Além do entendimento do impacto das diferentes condições de cocção sobre as transformações ocorridas no produto disto, para o projeto de fornos de cocção, é necessário o conhecimento das propriedades termofísicas deste produto. Em alimentos, estas propriedades dependem da temperatura, composição e estrutura física, além das condições sob as quais as medidas destas propriedades são realizadas. No processo de cocção, a pizza sofre grandes variações em seu conteúdo de água. Como os produtos alimentícios são composições de diferentes materiais, os valores de suas propriedades termofísicas são valores médios. Estes valores são, no entanto, algumas vezes bastante diferentes, devido às diferentes condições nas quais foram avaliados e diferentes origens para um mesmo alimento, composição e estrutura.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho será estudar o impacto das diferentes configurações de um forno na qualidade da pizza, estabelecendo-se as melhores condições para a sua cocção e caracterizando-se os mecanismos de transferência de calor predominantes. Para a realização deste estudo, será desenvolvido um protótipo do forno e serão utilizadas pizzas sabor de muçarela, obtidas diretamente do fornecedor. Pizza de muçarela foi escolhida por conter os dois componentes mais expressivos da pizza: massa e queijo; componentes comuns à praticamente todos os sabores de pizzas.

Os objetivos específicos incluem:

- Busca, na literatura, por informações que contribuam para o entendimento do processo de cocção e da definição do termo *qualidade* em alimentos, bem como das ferramentas utilizadas para a determinação desta qualidade, subsidiando o LABTUCAL na avaliação da capacidade que tem um forno em produzir pizzas nestes termos;
- Determinação das faixas de aceitação de qualidade da pizza, em termos da cor;

- Efeito dos diferentes mecanismos de transferência de calor e do material da base do forno, em contato com a pizza, sobre sua qualidade;
- Determinação das melhores configurações do forno para a cocção da pizza;
- Determinação das condições de operação do forno, através do ajuste dos parâmetros controláveis (tempo, temperatura, velocidade do ventilador);
- Caracterização térmica do processo de cocção, estabelecido com base nas configurações e condições de operação do forno selecionadas;
- Determinação da difusividade e condutividade térmica da massa da pizza que serão futuramente utilizadas em simulações numéricas que se fizerem necessárias ao projeto de fornos de pizza com uso de termossifões.

Os termos configuração e condições de operação do forno serão utilizados, neste trabalho, com sentidos diversos: configuração do forno refere-se à forma como os diferentes mecanismos de transferência de calor são combinados durante a cocção da pizza; condição de operação do forno refere-se à combinação das diferentes temperaturas, velocidades do ventilador e diferentes tempos de cocção testados.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Este estudo será realizado como forma de conhecer o comportamento do alimento durante a cocção e estabelecer as melhores configurações e condições de operação do forno para a cocção da pizza, subsidiando futuramente o desenvolvimento de um forno com termossifões e uso de gás natural, pelo LABTUCAL, como uma alternativa aos fornos elétricos e a lenha, existentes no mercado. Estudos prévios relacionados às transformações que ocorrem no alimento e em suas propriedades termofísicas durante a cocção são essenciais nas etapas que antecedem o projeto de um forno, evitando-se que posteriormente esse alimento tenha que se ajustar (em sua composição, forma, espessura) ao forno desenvolvido. Toda a pesquisa será baseada no efeito das diferentes configurações e condições de operação do forno sobre a qualidade da pizza. Conhecimentos na área da Ciência dos Alimentos e da Estatística foram utilizados como ferramentas na determinação dos parâmetros de qualidade da pizza, de sua aceitabilidade frente aos consumidores, na análise de dados e na tomada de decisões.

O interesse do estudo concentrar-se-á na busca por ajustes nas variáveis do processo de cocção de pizzas, cujos atributos de qualidade avaliados deverão encontrar-se dentro de uma faixa de qualidade aceitável, que será previamente estabelecida. Não será

foco deste trabalho o processo de obtenção das massas de pizza. Haverá, assim, uma grande preocupação pelo estudo conjugado entre as configurações e condições de operação do forno, a qualidade da pizza nele assada e a aceitabilidade desta qualidade pelos consumidores, na busca de respostas para este trabalho.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este estudo está estruturado em capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução ao assunto, os objetivos do trabalho e a justificativa do tema. O segundo capítulo apresenta a revisão da literatura referente a produtos de panificação, transferência de calor em alimentos, qualidade dos alimentos e determinação das propriedades termofísicas.

No terceiro capítulo estão descritos os materiais utilizados, os procedimentos para a caracterização térmica do protótipo, a metodologia utilizada para as medidas de qualidade da pizza assim como para a determinação da condutividade e da difusividade térmica da massa da pizza.

O quarto capítulo expõe os resultados experimentais e suas respectivas discussões. No quinto capítulo encontram-se as conclusões e recomendações do trabalho. Por fim, o sexto capítulo apresenta as referências bibliográficas utilizadas.

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PIZZA

A massa de pizza é um tipo de produto de panificação classificada como *flat bread* (pão achatado), cujos ingredientes essenciais são farinha de trigo, água, sal, açúcar, óleo e leveduras. As massas de pizza são diferenciadas principalmente por sua espessura, podendo ser finas, com espessura em torno de 0,3-0,65 cm, ou espessas, entre 0,65-1 cm. As coberturas são feitas com os mais variados sabores e temperos, sendo tradicionalmente empregados molho de tomate e o queijo em sua formulação. (SPOONER, 1989 apud QUAROONI, 1996).

A classificação dos pães achatados e exemplos típicos desses produtos são apresentados na Figura 2.1. Essa classificação é feita com base no corte da transversal da massa assada, no tipo de fermentação empregada e nos ingredientes utilizados na sua formulação. (QUAROONI, 1996).

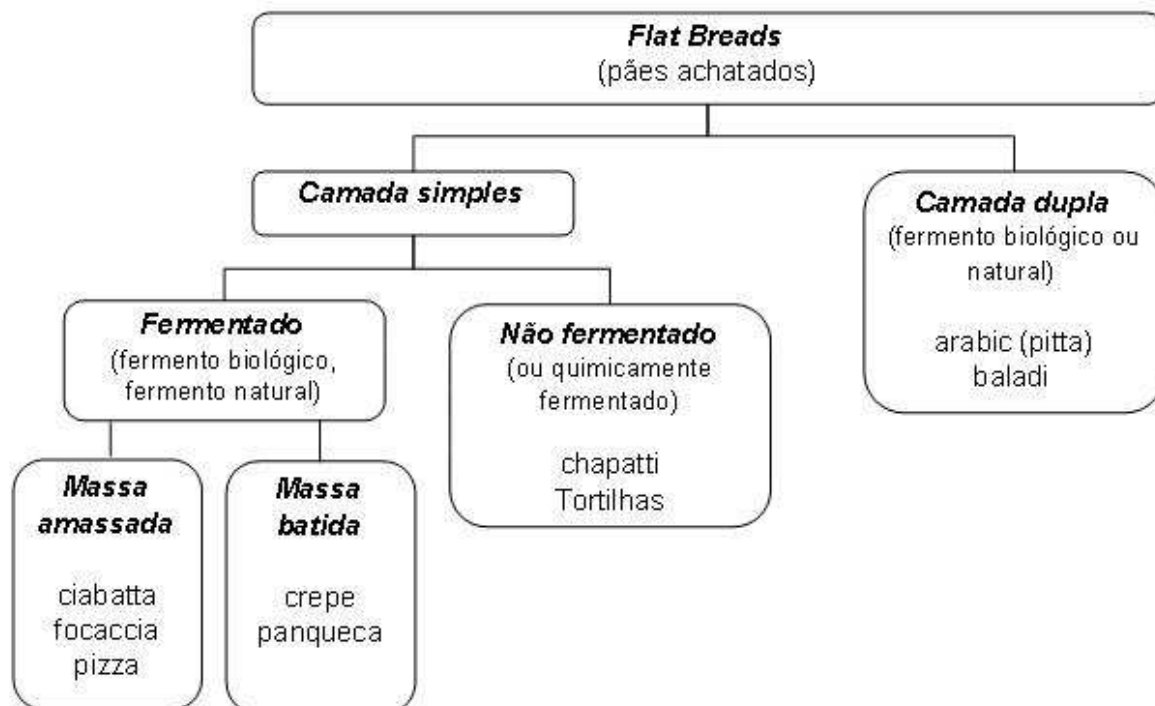


Figura 2.1 – Classificação dos pães achatados (Fonte: QUAROONI, 1996).

A primeira fase da formação da massa consiste na mistura da água, da farinha de trigo e demais ingredientes e no emprego de energia mecânica. O emprego da energia mecânica origina uma força de coesão entre os ingredientes, provocando reações químicas. Também, por ação desta força de coesão, as proteínas do trigo que apresentam dimensões diferentes formam uma massa viscosa e elástica denominada glúten. Durante essa fase, é importante o controle e correção da temperatura da água, pois o calor cedido pela máquina amassadora e pela hidratação do trigo (calor de hidratação) influencia fortemente o metabolismo das leveduras. Nesta etapa, o aumento do metabolismo das leveduras não é desejado. Durante a fermentação há produção de gás carbônico, responsável pela formação de alvéolos internos e pelo crescimento da massa; a ação mecânica da amassadora faz com que este seja perdido para o meio, originando uma massa com pouco volume. (QUAGLIA, 1991).

Após o amassamento, a massa é repousada. O repouso é a fase entre o final do amassamento e cocção em que ocorre a primeira etapa da fermentação e, na qual a massa sofre uma série de transformações que lhe confere propriedades físicas e organolépticas características. Há a produção de gás carbônico pelas leveduras e a expansão da massa, propiciando uma uniformidade da sua estrutura celular. A etapa final da fermentação ocorre dentro do forno. Em temperaturas inferiores a 55°C, as leveduras encontram-se ainda em atividade. Em temperaturas superiores a 40°C, esta atividade é reduzida, cessando aos 65°C. (QUAGLIA, 1991).

Com relação ao corte transversal da massa, os *flat breads* podem-se dividir em dois grandes grupos; os de camada simples (*single-layered*) e os de camada dupla (*double-layered*). A distinção entre esses dois produtos é atingida pelo método de processamento da massa, apresentado na Figura 2.2. Nos produtos de camada única, a massa é assada logo após a sua abertura. A massa pode ser perfurada com um rolo dentado, com palitos ou ser parcialmente cortada antes do crescimento final da massa ou da cocção. Durante o primeiro estágio da cocção, essas pequenas aberturas dão passagem à saída do vapor e do CO₂, além de outras substâncias voláteis, formadas durante a fermentação. Para a produção dos produtos de dupla camada, deixam-se os pedaços de massa aberta crescer antes da cocção, sem perfuração da massa. Essa etapa permite que a massa relaxe, fique airada e desenvolva uma fina película sobre a superfície. Conseqüentemente, durante a cocção e principalmente em fornos com altas temperaturas, essa fina película vai dando lugar a uma crosta mais espessa e flexível. O vapor da água livre contida na massa, juntamente com a pressão do CO₂ e outras substâncias voláteis desenvolvidas durante a fermentação, força a parte inferior da massa contra a superior, separando-as e formando uma dupla camada de massa assada. (QUAROONI, 1996).

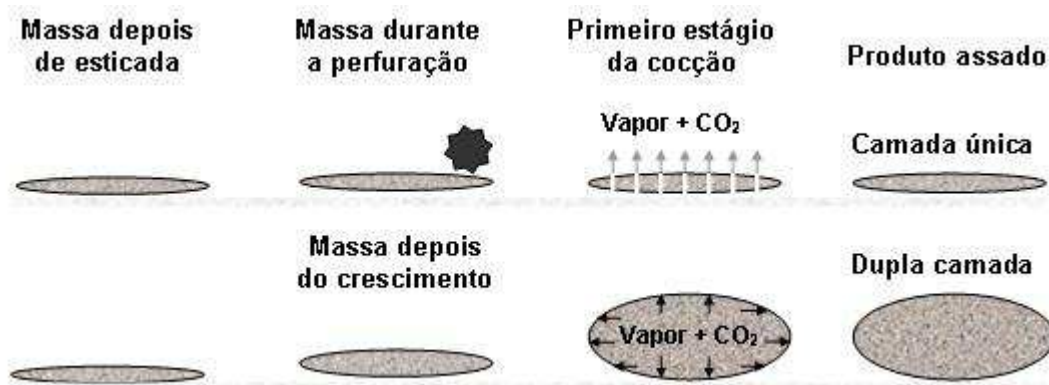


Figura 2.2 – Diferença entre o processamento de pães achatados de única camada e de dupla camada. (Fonte: QUARRONI, 1996).

O processamento térmico de produtos de panificação (pães, biscoitos, bolachas e massas) envolve, simultaneamente, aquecimento pelos mecanismos de condução, convecção e radiação. Essa atuação do calor resultará em mudanças nas propriedades físicas dos produtos. Essas mudanças incluem, comumente: (YONG; EMERY; FRYER, 2002)

- Perda de umidade devido ao transporte consecutivo da umidade interna por difusão e externa, por evaporação, envolvendo absorção de calor latente;
- Aumento da temperatura interna do produto;
- Mudanças no tamanho do produto, devido à expansão das células de gás no seu interior;
- Desenvolvimento da estrutura interna e externa, incluindo a crosta e;
- Mudanças na coloração do produto, como resultado de reações ocorridas especialmente em regiões de baixa umidade.

Assim, quando um alimento é colocado no forno, o calor atua no sentido de desenvolver características desejáveis ao produto. A cocção de produtos panificáveis é um processo complicado e as condições ótimas desse processo variam com o tipo de alimento e até mesmo com a formulação de um tipo específico de alimento. No desenrolar da cocção, dois processos ocorrem simultaneamente e estão fortemente relacionados: *transferência de calor* do forno ao alimento, causando inúmeras modificações no seu interior e em sua superfície e *transferência de massa*, com a migração da umidade do interior à superfície e posterior evaporação. (XUE; WALKER, 2003). Essas modificações realçam as qualidades sensoriais do alimento e promovem maior ou menor perda de umidade, dependendo do

produto. Ao contrário da desidratação, onde a intenção é remover a maior quantidade de umidade possível com minimização das mudanças na qualidade sensorial, na cocção de produtos de panificação, o calor é usado propositalmente para induzir essas mudanças na superfície do alimento, com retenção de umidade em alguns produtos (bolo, pães etc.). Em outros produtos, como biscoitos, torradas e *crispbreads*, a perda de umidade é necessária para se obter a textura crocante desejada. (PATEL; WANISKA; SEETHARAMAN, 2005).

Simultaneamente, durante a cocção, diferentes fenômenos bioquímicos e físico-químicos têm lugar, em intervalos característicos de temperatura: a gelatinização do amido, coagulação protéica; a reação de *Maillard*, juntamente com a caramelização dos açúcares, responsáveis pela coloração, aromas e sabores do produto; a eliminação da água, com formação do miolo e da crosta. A cinética dessas reações depende da cinética térmica da massa na cocção, isto é, da temperatura da massa durante a cocção. Atualmente, o perfil térmico de produtos de panificação tem sido investigado por alguns autores (AUDIDIER, 1968; GIOVANELLI; PERI; BORRI, 1997), contribuindo para o entendimento destes fenômenos. A Figura 2.3 apresenta um mapa de cocção, proposto por Swortfinger (1968 apud PATEL; WANISKA; SEETHARAMAN, 2005), no qual a temperatura atingida pela massa é relacionada ao tempo de cocção, onde se destacam os principais estágios e mudanças ocorridas durante esse período.

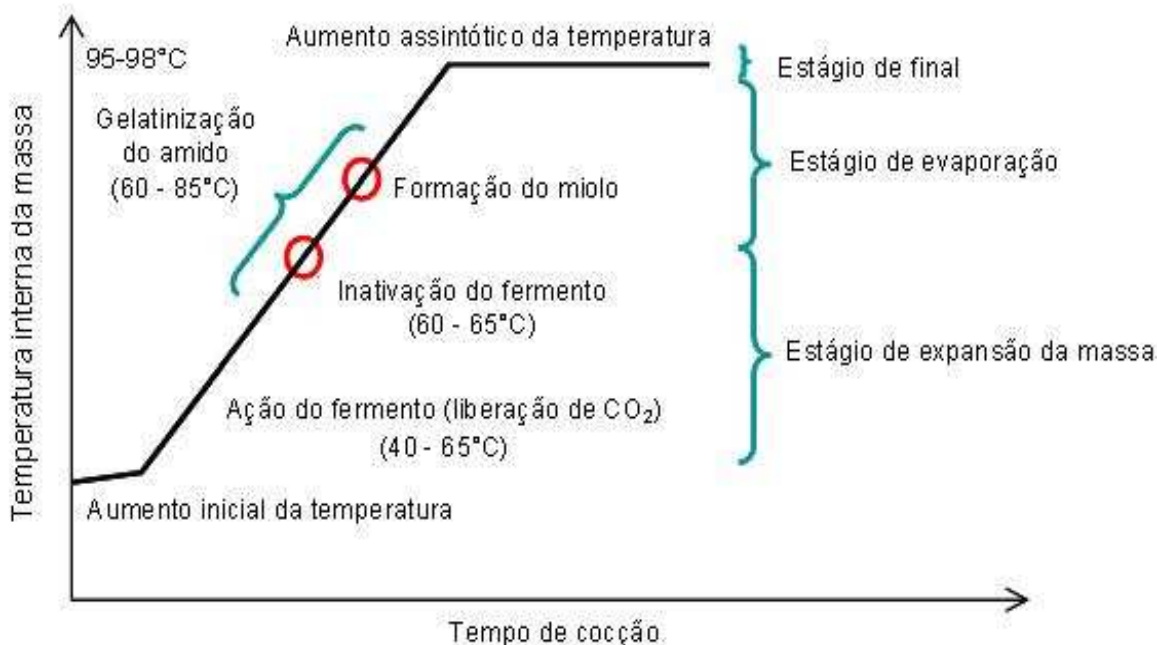


Figura 2.3 – Mapa de cocção indicando os estágios da cocção em função do tempo de cocção e da temperatura da massa (Fonte: SWORTFINGER (1968), apud PATEL; WANISKA; SEETHARAMAN, 2005).

Na fase de aquecimento, quando a massa é colocada no forno aquecido, a baixa umidade deste cria um gradiente de pressão parcial de vapor, causando evaporação da umidade da superfície do alimento e, conseqüentemente, movimento da umidade do interior do alimento para a superfície. A perda de umidade é determinada pela natureza do alimento, pelo movimento do ar no forno e pela taxa de transferência de calor. Quando a taxa de perda de umidade pela superfície excede a taxa de movimento da umidade do interior do alimento para a superfície, a zona de evaporação move-se para dentro do alimento; a superfície seca, sua temperatura eleva-se acerca da temperatura do ar quente (110-240°C), iniciando a formação da crosta. Como a cocção acontece à pressão atmosférica e a umidade escapa livremente, a temperatura interna do alimento não ultrapassa 100°C, enquanto houver água em sua composição. A pressão parcial no interior da massa cresce devido à geração de vapor d'água e ao CO₂, produzido por leveduras ou fermento químico em temperaturas de 40-65°C, iniciando-se a expansão da massa. (ZHANG; DATTA, 2006; QUAGLIA, 1991). É nessa fase que ocorrem alterações nas propriedades reológicas, devido à gelatinização do amido e a desnaturação protéica, com formação do miolo e da crosta. Esses fenômenos ocorrem num mesmo intervalo de temperatura de 60-85°C. (CUQ; ABECASSIS; GUILBERT, 2003; ZANONI; SMALDONE; SCHIRALDI, 1991). As proteínas irão coagular e formar uma matriz sólida, enquanto que os grânulos de amido, em presença suficiente de água, irão inchar, passando de um estado cristalino a um estado elástico e amorfo, formando uma matriz esponjosa. (HADIYANTO et al., 2007; THORVALDSSON; SKJÖLDEBRAND, 1998).

As proteínas e os açúcares juntos, na presença de calor, reagem irreversivelmente formando compostos responsáveis pelo escurecimento do produto. Temperaturas relativamente altas são necessárias para que essas reações ocorram. Geralmente essas temperaturas são só atingidas na parte externa do produto, que se apresenta suficientemente seca, tendo uma baixa atividade de água e correspondendo a uma elevada temperatura de evaporação. (HADIYANTO et al., 2007).

2.2 FORNOS

A razão da cocção de alimentos é alterar as propriedades sensoriais dos produtos, melhorar sua palatabilidade e aumentar a variedade de sabores, aromas e texturas de produtos que têm como base as mesmas matérias-primas. Além disso, a cocção tem como objetivo destruir enzimas e microrganismos e diminuir a atividade de água do produto, visando sua segurança e aumento da vida de prateleira. (FELLOWS, 1988).

Na panificação, é a ação do calor que transformará a massa crua em um produto leve, poroso, aromático e digestível. Para que estes e outros requisitos de qualidade,

específicos para cada produto, sejam alcançados, presume-se um controle cuidadoso na etapa de cocção. A taxa e a quantidade de calor aplicado, a umidade na câmara e o tempo de cocção têm grande influência sobre a qualidade final do produto. (THERDTHAI; ZHOU; ADAMCZAK, 2002). Diferentes tipos de fornos produzem diferentes resultados de cocção. O calor pode atuar de maneira indireta no alimento e, dependendo da distribuição deste calor dentro da câmara, o alimento cozinha de forma mais ou menos homogênea. Hoje, os diferentes materiais utilizados e a variação das fontes de energia podem indicar o forno mais adequado para cada tipo de produção.

A cocção de produtos de panificação é uma operação bastante complexa, envolvendo inúmeras alterações físico-químicas que afetam a textura, cor, *flavor* (sensação simultânea do aroma e do gosto), volume do produto, etc. Essas alterações são conseqüências da transferência de calor ao alimento, pelo ar e pelas superfícies quentes e da transferência de massa, através da evaporação da água do produto e da movimentação do ar no interior do forno. (ZAREIFARD; MARCOTTE; DOSTIE, 2006). O calor que atinge o alimento provém da combinação dos três principais mecanismos de transferência de calor: radiação, pelas paredes do forno; convecção, pela circulação do ar em contato com o alimento e condução, através do contato entre uma superfície e o alimento. O calor transferido por convecção natural do ar, ao atingir o alimento, é transferido por condução através da sua superfície. (FELLOWS, 1988). Como conseqüência desta interação do ar com a superfície, o ar desenvolve uma camada limite, hidrodinâmica, associada ao seu escoamento, ao mesmo tempo em que desenvolve uma camada limite térmica, associada à diferença de temperatura entre o ar e a superfície. Essa camada limite age como uma resistência térmica à transferência de calor ao alimento e ao movimento do vapor de água que deixa o alimento. A espessura da camada limite é determinada principalmente pela velocidade do ar e pelas propriedades da superfície do alimento. (INCROPERA; DEWITT, 1998; FELLOWS, 1988).

O tipo e as condições em que as diferentes fontes de calor (convecção, radiação, microondas, condução) são aplicadas podem ser alterados para se controlar as transformações no produto. A maioria dos estudos, que visam à melhoria dos processos de cocção pela combinação dessas fontes, é baseada em observações experimentais. (HADIYANTO et al., 2008).

Correntes convectivas promovem uniformidade na distribuição de calor do forno. A heterogeneidade no aquecimento de fornos é freqüentemente reportada como um importante problema na indústria de panificação. Além da temperatura do forno, a taxa de remoção de umidade é controlada pela velocidade do ar no seu interior. (ZAREIFARD; MARCOTTE; DOSTIE, 2006; DE BONIS; RUOCCO, 2007). Assim, muitos fabricantes de fornos têm provido esses equipamentos com ventiladores, que suplementam as correntes

de convecção natural e reduzem a espessura da camada limite, aumentando, assim, os coeficientes de transferência de calor, melhorando a eficiência energética do forno. (FELLOWS, 1988; SATO; MATSUMURA; SHIBUKAWA, 1987). O coeficiente de transferência de calor, h , é um importante parâmetro que caracteriza o aquecimento por convecção forçada, pois expressa a influência do fenômeno de transporte de ar na taxa de transferência de calor para o alimento. (VERBOVEN et al., 2001).

Costumeiramente, pensava-se que a radiação era o mecanismo de transferência de calor mais importante em fornos de panificação. Essa idéia vem sendo gradualmente mudada e novas abordagens, que utilizam as vantagens dos outros mecanismos de transferência de calor durante a cocção, vêm surgindo. Hoje, sabe-se que o mecanismo pelo qual o calor é transferido ao alimento é mais importante para se obter um produto com a qualidade desejada do que simplesmente o fornecimento da quantidade de calor necessária à sua cocção. (SAXENA; HARIDAS; RAGHAVA, 1995).

Nos fornos convencionais, encontrados em fogões domésticos, a fonte de calor situa-se na base do forno. O calor é conduzido ao alimento principalmente por condução, através da forma, e por convecção natural, através do ar aquecido. Existe, ainda, nestes fornos, dispositivos que possibilitam gratinar rapidamente o alimento, através da radiação térmica. Este dispositivo é o mais utilizado para aqueles alimentos que respondem bem à radiação térmica, como carnes e batatas, ou para dar cor ao alimento, no final da cocção, como é o caso de pães e massas.

No forno de convecção forçada, o ar aquecido é distribuído por uma ventoinha, proporcionando um cozimento mais rápido que os fornos convencionais, ótimo para carnes assadas pouco sensíveis e produtos que precisam de crosta e coloração. Dentre os fornos de convecção forçada, existem os *jet impingement*, nos quais ar em forma de jatos, em alta velocidade, são forçados perpendicularmente contra o produto, aumentando a eficiência térmica e diminuindo o tempo de cocção. (XUE, WALKER, 2003).

Existe, ainda, no mercado, o forno combinado: combina calor seco, ventilação e cocção com adição de umidade em diferentes porcentagens, possibilitando inclusive a cocção totalmente no vapor. Possui um termômetro para a medição da temperatura interna dos assados e software onde se pode programar o tempo de cocção, diferentes temperaturas e ainda a combinação de calor seco e úmido em uma só produção.

Em pizzarias, encontram-se fornos a lenha, cuja temperatura da base em contato com a pizza chega a 580°C e a cocção de uma pizza leva de 1 a 3 minutos. Nestes fornos, o calor gerado concentra-se em pequenas áreas internas, gerando zonas excessivamente quentes, obrigando o pizzaiolo a girar constantemente as pizzas para que se obtenha uma cocção mais uniforme do produto.

O LABTUCAL vem, desde 1997, desenvolvendo fornos de cocção de pães utilizando tecnologia de tubos de calor e termossifões. Os termossifões proporcionam rápido aquecimento do forno e uma temperatura interna mais uniforme, gerando um produto de qualidade mais homogênea e, assim, menos perdas para o produtor.

Os ciclos de cocção são, tipicamente, estabelecidos sem prévio entendimento do processo, requerendo tempo para os ajustes necessários e uma considerável quantidade de produtos com defeitos. Segundo Zareifard, Marcotte e Dostie (2006), vários são os fatores que afetam a cocção de um alimento: condições internas do forno (velocidade do ar, temperatura, umidade) e o material de contato com o alimento. Fahloul et al. (1995) cita a importância de se medir o fluxo de calor que atinge o alimento no entendimento do processo de cocção. A temperatura do ar é, geralmente, usada para checar se a cocção está adequada, porém, esta medida assume uma relação direta com apenas alguns atributos de qualidade desejados ao produto. Muitos estudos têm sido desenvolvidos para entender as contribuições individuais dos diferentes mecanismos de transferência de calor em pães, biscoitos e bolos, em fornos elétricos, de convecção forçada ou a gás.

Baik et al. (2000) caracterizaram as condições de cocção de bolos em um forno elétrico, dispondo os bolos sobre formas, e um forno a gás, dispondo-os sobre uma esteira. A condução representou em média 79% do calor transferido para o bolo no forno elétrico e, 46,6% no forno a gás. A parcela radiativa representou 14,6% no elétrico e 43%, no forno a gás. A convecção, por sua vez, representou 6,4% no forno elétrico e 10,4% no forno a gás. A velocidade do ar e a temperatura empregada, segundo o autor, tiveram efeitos significativos na perda de peso, altura e escurecimento do produto, sendo que a temperatura foi o fator que mais afetou o volume dos bolos. Posteriormente, estes autores avaliaram os parâmetros de qualidade, relacionados ao bolo, sob as condições de cocção bem caracterizadas.

Fahloul et al. (1995) avaliou os fluxos de calor na cocção de biscoitos em forno com queima indireta de gás, através estudos teóricos e experimentais. Do total de calor transmitido aos biscoitos, 49% deve-se à radiação e 40%, à convecção natural. Standing (1974), citado por Yong, Emery, Fryer (2002), reportou que a condução é responsável pelo desenvolvimento da espessura e da estrutura do biscoito, enquanto que a convecção afeta principalmente a perda de umidade e a radiação, o escurecimento de sua superfície. Yong, Emery, Fryer (2002) conduziu estudos com biscoitos para investigar a influência dos mecanismos de transferência de calor sobre a qualidade desse tipo de alimento. Segundo os resultados, a condução afeta significativamente a expansão da massa, principalmente no estágio inicial da cocção. O autor compara ainda o desenvolvimento da espessura da massa de biscoito quando três materiais são utilizados como base para o alimento; alumínio, material isolante e a própria esteira do forno. Com o uso da própria esteira a massa

apresentou seu desenvolvimento máximo de 110% após 6 minutos. Com a base de alumínio e material isolante, o desenvolvimento da espessura da massa foi de 100% e 85%, ocorridos após 8,5 e 11 minutos, respectivamente.

Silva (2001) desenvolveu um modelo teórico para a determinação dos principais mecanismos de troca térmica, considerando-se somente a contribuição da radiação e da convecção natural, envolvidos na cocção de pães no interior do protótipo de um forno de cocção. Constatou que o fluxo radiativo representa aproximadamente 76% da energia absorvida pelo pão.

Chiavaro et al. (2006) estudaram a influência de diferentes métodos de cocção nas propriedades físico-químicas selecionadas de batatas, a fim de avaliar a importância da introdução de vapor e identificar as melhores condições de cocção.

Experimentos conduzidos por Sato, Matsumura e Shibukawa (1987) avaliaram os coeficientes de troca térmica por convecção e por radiação em um forno elétrico a 220°C (resistência localizada na parte inferior e direita do forno) e com convecção forçada. O coeficiente de transferência de calor total (radiação+convecção) foi estimado utilizando-se um cilindro de alumínio coberto com resina de silicone (emissividade próxima a 1). O coeficiente de transferência de calor por radiação foi avaliado pela temperatura média das superfícies e o coeficiente de transferência de calor por convecção, pela diferença entre o h_{total} e o h_{rad} , resultando em valores próximos a 23 W/m²°C. O h_{rad} obtido foi de aproximadamente 12 W/m²°C.

Yong, Emery e Fryer (2002) estudaram a contribuição dos diferentes mecanismos de transferência de calor durante a cocção de massa tipo biscoito a diferentes temperaturas em um forno elétrico com convecção forçada. Utilizaram blocos de alumínio polido e coberto com tinta preta de alta emissividade apoiados sobre uma base isolante para a determinação da contribuição dos fluxos de calor por convecção e radiação. O h_{conv} determinado neste estudo a 180°C foi de 31±0,3Wm⁻²K. Os fluxos de calor por radiação e condução foram avaliados através dos dados de temperatura. Concluíram ser a convecção o mecanismo predominante, seguido da radiação.

Cruz (2006) avaliou os mecanismos de troca térmica em uma câmara de combustão, pela mesma metodologia apresentada neste trabalho, usando, no entanto, blocos pequenos, polidos e pretos. O valores de h_{conv} obtido foi próximo a 26W/m²°C, enquanto o h_{rad} , próximo de 20W/m²°C.

Na indústria de panificação, propriedades físicas como temperatura, conteúdo de umidade, cor, tamanho e outras propriedades relacionadas às características sensoriais, próprias para cada tipo de produto, determinam sua qualidade frente ao público consumidor. Modificações em uma dessas propriedades estão, em geral, relacionadas às mudanças

feitas nas condições de processamento térmico e acarretam na modificação das demais propriedades.

Para o entendimento das mudanças físicas que ocorrem no produto durante a cocção, as propriedades da câmara de cocção devem ser caracterizadas (YONG; EMERY; FRYER, 2002). Assim, o projeto de fornos mais eficientes e processos com menos perdas devido a produtos defeituosos, requer o conhecimento da influência dos mecanismos de transferência de calor, do material da base, da velocidade do ar e da temperatura na qualidade do produto.

2.3 REQUISITOS DE QUALIDADE

O termo “qualidade” tem sido usado em muitos contextos. No entanto, o seu significado não é, muitas vezes, claro. Um grande número de definições têm sido propostas, tomando sempre como referência a situação e o problema a ser solucionado em cada caso.

Em uma comparação bem fundamentada da qualidade de produtos alimentícios, a avaliação global da qualidade de alimentos e a descrição quantitativa desta qualidade têm se tornado significativas, principalmente nas áreas de desenvolvimento de novos produtos e equipamentos, de controle de qualidade e de ajustes de formulações e processos.

Segundo Molnár (1995), a qualidade de produtos alimentícios é determinada, em relação às necessidades e a aceitabilidade dos consumidores, pelos atributos sensoriais do produto, pelo valor nutricional, pela conveniência (como o tempo de prateleira, embalagem e rotulagem do produto) e pelos níveis de contaminantes microbiológicos e toxicológicos. Nesta definição, a segurança alimentar tem significância primária para a qualidade dos alimentos. Qualquer falha relacionada aos requisitos de segurança alimentar representa risco ao consumidor e é punível por leis específicas.

Dentre estes atributos, os sensoriais, que estão geralmente relacionados com a textura, aparência, coloração, sabor e aroma, são ainda mais difíceis de se definir, pois não estão relacionados somente com as propriedades ou características do alimento, mas também ao resultado da interação entre o alimento e seu consumidor.

Esta qualidade, segundo Cardello (1995), é definida com base no conhecimento de estudiosos e pesquisadores e inclui uma série de testes instrumentais padronizados para a sua quantificação. Estes estudiosos e pesquisadores, certamente, têm claro o que constitui uma boa qualidade nutricional, qualidade microbiológica, qualidade textural etc, nos alimentos. No entanto, pesquisadores na área de alimentos representam uma pequena parcela das pessoas às quais a qualidade diz respeito. O restante destes interessados são

os consumidores – pessoas cuja definição de qualidade de alimentos dirige a economia das indústrias de alimentos.

Qualquer que seja o método utilizado para a avaliação de qualidade de alimentos, o primeiro passo deve ser a identificação e definição das especificações ou padrões de qualidade relacionados ao objetivo do estudo. O segundo passo corresponde ao desenvolvimento de uma metodologia de testes para avaliar, de forma confiável, se o produto está ou não dentro dos padrões de qualidade definidos.

A identificação e definição das especificações ou padrões de qualidade podem ser feitas selecionando-se aquelas características de maior incidência na qualidade do alimento, o que torna possível decidir se o alimento satisfaz, ou não, os requisitos de um certo grau de qualidade de uma forma mais simples. (COSTELL, 2002).

Dentre os atributos de qualidade, os relacionados à segurança e às características sensoriais são diretamente influenciados pela temperatura de processamento do alimento. Deve-se garantir, para isso, que todas as partes do alimento tenham sido suficientemente processadas, sem perda inaceitável de qualidade.

2.3.1 Requisitos de Segurança

O processo de preparo da pizza ocorre sob intensa manipulação e esta é, sem dúvida, uma das causas de contaminação microbiana. A contaminação microbiana compromete a qualidade sanitária do alimento, caracterizando um perigo biológico ao consumidor. A doença pode ser causada pela ingestão de células viáveis do microrganismo patogênico (*infecção alimentar*) ou de toxinas previamente elaboradas por um microrganismo no alimento (*intoxicação alimentar*), ou ainda quando ocorre em conjunto a colonização do microrganismo e ação das toxinas (*toxinfecção alimentar*). (SENAI, 1999).

Pizza é um alimento comumente relatado em surtos de doenças transmitidas por alimentos. Muitas vezes a manipulação da massa é feita em condições de higiene precárias e a temperatura dos fornos é inadequada, sendo o tempo de cocção insuficiente para eliminar os microrganismos patogênicos.

Recentemente, um estudo da Secretaria do Estado da Saúde de São Paulo informou que as pizzarias deste estado lideram o ranking da falta de higiene dos estabelecimentos que vendem comida industrializada. Equipes da vigilância sanitária, estaduais e municipais, encontraram problemas relacionados à manipulação de alimentos em 31% das 467 pizzarias visitadas. (SECRETARIA DO ESTADO DE SAÚDE DE SÃO PAULO, 2008).

Entre os microrganismos que podem estar presentes em alimentos formulados, como é o caso da massa da pizza, pode-se citar: *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella sp.*, coliformes termotolerantes. Os padrões microbiológicos para alimentos são estabelecidos pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e, no caso da massa de pizza, são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Padrão microbiológico para a massa de pizza

<i>Microorganismo</i>	<i>Limites de rejeição</i>
<i>Bacillus cereus</i> (UFC.g ⁻¹)	> 10 ³
<i>Staphylococcus coagulase positiva</i> (UFC.g ⁻¹)	> 10 ³
Coliformes termotolerantes (NMP.g ⁻¹)	> 10 ²
<i>Salmonella sp.</i>	Ausência/ 25g

Fonte: ANVISA - Resolução RDC nº 12, de 02 de janeiro de 2001. Nota: Os limites aceitáveis foram obtidos para pratos prontos para consumo à base de farinha, grupo nº22 desta resolução. UFC.g⁻¹: Unidades Formadora de Colônia por grama de alimento. NMP.g⁻¹: Número Mais Provável por grama de alimento.

O Departamento de Serviços Humanos de Victoria, na Austrália, reportou um surto de infecção alimentar por *Salmonella* Typhimurium ocorrida em uma pizzaria, envolvendo cerca de 90 pessoas. (DEPARTMENT OF HEALTH AND AGEING, 2004).

A General Mills, empresa de alimentos, dona das marcas Frescarini e Häagen-Dazs, dentre outras, anunciou um *recall*, em 2007, de cerca de 414 mil unidades das pizzas congeladas das marcas Jenos e Totino's. O vilão seria o pepperoni contaminado com a bactéria *E.coli* O 157: H7. (GENERAL MILLS, 2007).

Blume, Milech e Ribeiro (2005) avaliaram a carga microbiana de pizzas congeladas na região de Pelotas/RS e concluíram que 12,5% e 37,5% das amostras analisadas apresentaram contaminação por *Staphylococcus* coagulase positiva e por coliformes termotolerantes (*Escherichia coli*), respectivamente, acima dos níveis estabelecidos pela legislação. Os maiores valores encontrados por esses autores para *Staphylococcus* coagulase positiva e coliformes termotolerantes foram 5,6 x10⁵ e 2,3x10⁶, respectivamente.

Estudos desenvolvidos por Freitas et al. (2004) demonstraram que 66,6% das amostras de massas de pizza pronta e refrigerada apresentaram valores de coliformes termotolerantes superiores aos estipulados pela ANVISA (5x10 NMP.g⁻¹), onde em 27% foi confirmada a presença de *Escherichia coli*. O armazenamento das massas à temperatura ambiente favoreceu o desenvolvimento dos microrganismos e a temperatura de refrigeração não foi suficiente para evitar que as amostras se situassem, em termos de bolores e

leveduras, na faixa de qualidade imprópria para consumo. Esta situação sugere que as condições higiênico-sanitárias durante o processamento do produto, embalagem e armazenamento, contribuíram para a impossibilidade de que as amostras chegassem ao final do prazo de validade, mesmo sob refrigeração.

A Vigilância Sanitária da Secretaria Municipal de Saúde, em Uberlândia/MG, em 2003, analisou 50 amostras de pizzas semi-prontas, de fabricação caseira. O resultado foi que 48% das amostras estavam contaminadas por bactérias do tipo *staphylococcus aureus*, *bacillus cereus* e coliformes fecais. (TRIÂNGULOMINEIRO.COM, 2003).

Bacillus cereus é um agente de toxinfecção alimentar encontrado largamente na natureza. Tem o solo como o seu reservatório natural, contaminando facilmente vegetais, cereais e condimentos. É encontrado ainda na superfície da carne bovina, suína e de frango, possivelmente por contaminação através do solo. Crescem em temperaturas entre 8 e 55° C, com crescimento ótimo entre 28 e 35°C. Des envolvem-se em pH de 4,9 a 9,3. A atividade de água mínima (parâmetro relacionado à umidade do alimento) para o crescimento é de 0,95. A dose infectante varia de 10⁶ a 10⁸ UFC.g⁻¹. (JAY, 2005, apud AMORIM, 2008). Tem a característica de ser esporulado, ou seja, podem formar esporos quando a célula vegetativa não se encontra em um meio ideal para o seu desenvolvimento. O esporo é uma forma de resistência do microrganismo unicelular, ao redor do qual forma-se uma espessa camada protetora, tornando-o resistente ao calor e outros fatores externos. Em condições propícias, os esporos podem germinar e a célula vegetativa, produzir toxinas. A toxina pode causar uma síndrome diarréica (enterotoxina, termolábil) e uma síndrome emética (exotoxina, termorresistente), sendo a segunda mais grave e aguda. (GAVA, 2002).

Staphylococcus aureus é um dos mais importantes causadores de intoxicação alimentar em humanos. Encontram-se, principalmente, nas mucosas nasais e oral, pele e cabelo de indivíduos saudáveis. Pode ser introduzida no alimento a partir de equipamentos e utensílios usados no processamento de alimentos, ou pela manipulação feita por pessoas portadoras do patógeno em secreções nasofaríngeas ou com ferimentos nas mãos. Entre as condições que favorecem a multiplicação da bactéria e, conseqüentemente, a produção de toxinas, estão a refrigeração e o aquecimento inadequado dos alimentos. A toxina do *S.aureus* é altamente termo-estável e, no caso da pizza, dificilmente destruída nas condições normais de cocção. (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 1996).

Os coliformes termotolerantes (coliformes fecais), tendo como representante a *Escherichia coli*, habitante exclusivo dos tratos intestinais, indicam contaminação de origem fecal, sendo um importante agente de infecção alimentar. *Salmonella* é uma das bactérias mais envolvidas em casos de infecção alimentar, tendo também como reservatório o trato gastrointestinal do homem e de animais. *Salmonella* Typhimuirum é o sorotipo mais encontrado em alimentos. (SENAI, 1999).

Perigos advindos desses microrganismos podem ser prevenidos por aquecimento dos alimentos, o suficiente para eliminar as bactérias. O processamento térmico é um dos poucos processos que conta com modelo matemático para garantir a segurança do produto. A base dessa teoria é a combinação do perfil tempo-temperatura, estabelecido pela transferência de calor e a cinética de destruição microbiana. A temperatura e o tempo aos quais será submetido o alimento dependerá do efeito que o calor exerce sobre ele e sobre os microrganismos relacionados com este alimento. A resistência, qualidade e quantidade dos microrganismos que oferecem risco à saúde, associadas à velocidade de transmissão de calor no interior do alimento, constituem os principais fatores determinantes da duração do processamento térmico. (HOLDSWORTH, 1985).

O conhecimento da resistência ao calor dos microrganismos encontrados em um alimento específico é usado para calcular as condições sob as quais deve ser submetido o alimento para a destruição destes microrganismos. Na prática, o microrganismo mais termo resistente é usado no cálculo das condições de processamento, assumindo-se que as espécies menos termo resistentes são também destruídas. (FELLOWS, 1988).

Para a avaliação de um determinado processamento térmico é fundamental o conhecimento de dois parâmetros relacionados com o microrganismo alvo: o tempo de redução decimal, conhecido como valor D , e a constante de resistência térmica, valor Z_m . O valor D , diferente para cada microrganismo, é definido como o tempo em minutos, a uma determinada temperatura, necessário para destruir 90% da população microbiana (N) presente no meio. Pode ser obtido da *curva de resistência térmica* do microrganismos (Figura 2.4a), que relaciona a população de microrganismos e o tempo de aquecimento à temperatura constante. Quanto maior o seu valor, maior é a resistência do microrganismo ao calor. Na prática, porém, a maioria dos alimentos não é aquecida à temperatura constante. Conforme a temperatura aumenta, a taxa de inativação ou índice letal aumenta e, conseqüentemente, o tempo de redução decimal diminui. O valor Z_m corresponde ao aumento de temperatura necessário para a redução de 90% do valor D , podendo ser obtido da *curva de destruição térmica* (Figura 2.4b), que relaciona o tempo de redução decimal e a temperatura. (FELLOWS, 1988). Os valores D , a temperatura de referência sob a qual esses valores são determinados e os valores Z_m dos microrganismos citados na Tabela 2.1 são apresentados na Tabela 2.2.

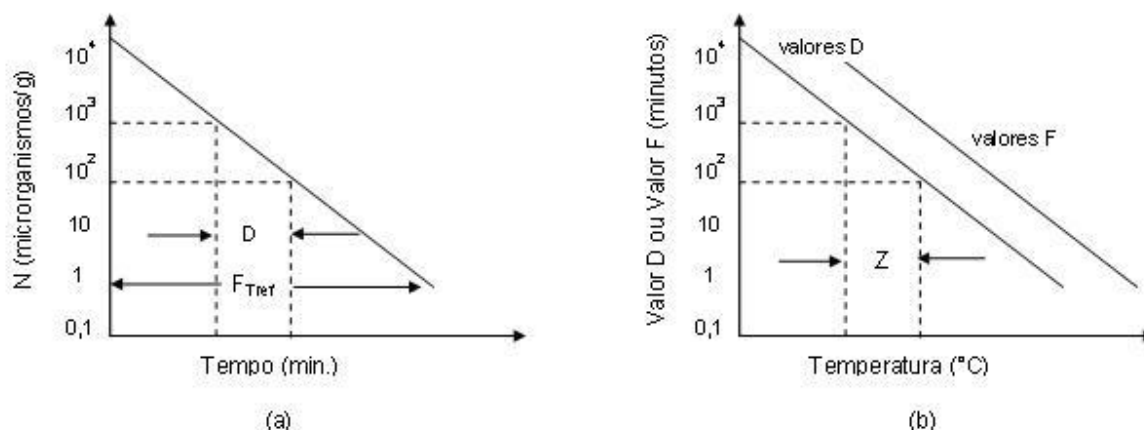


Figura 2.4 – (a) Curva de resistência térmica (b) Curva de destruição térmica

Tabela 2.2 – Valores D e Z para os microrganismos citados na Tabela 2.1.

<i>Microrganismo</i>	<i>Temperatura de referência (°C)</i>	<i>Valor D_{Tref} (s)</i>	<i>Valor Z_m (°C)</i>
<i>Salmonella spp</i>	65,6	17,4	6,5
<i>E. coli</i>	65,6	17,4	6,5
<i>S. aureus</i>	65,6	15,0	10,5
<i>B. cereus</i>	90	222	10,5

Fonte: Sunmer et al. (2005, apud AMORIM, 2008).

O nível de destruição térmica, valor F_{Tref} , também chamado de letalidade do processo, é definido como o tempo que o alimento deve ser processado a uma determinada temperatura de referência para se obter uma redução específica do número de microrganismos. Pode ser expresso em função de múltiplos de valor D. O valor F_{Tref} representa, então, a combinação tempo-temperatura recebida pelo alimento e pode ser calculado através da Equação (2.1), obtida a partir da Figura 2.4b (FRYER, ROBBINS, 2005; FELLOWS, 1988):

$$F_{Tref} = D_{Tref} (\log n_0 - \log n_f) \quad (2.1)$$

onde n_0 e n_f são os números de microrganismos iniciais e finais, respectivamente, e o subscrito T_{ref} indica a temperatura de referência sob a qual o valor D, e conseqüentemente o valor F_{Tref} , foram definidos.

No entanto, no processo de cocção, o alimento, devido a sua inércia térmica, não é aquecido à temperatura constante. À medida que a temperatura aumenta, a taxa de

inativação do processo aumenta. Desta forma, a letalidade de um processo depende do índice letal a certa temperatura e do tempo de exposição do alimento sob esta temperatura. O índice letal L calculado em relação a uma temperatura de referência, é dado pela Equação (2.2): (FRYER; ROBBINS, 2005)

$$L(t) = 10^{\frac{T(t)-T_{REF}}{Z_m}} \quad (2.2)$$

A letalidade integral de um determinado processo, o valor $F_{processo}$, é obtido pela integração da Equação (2.2) em relação ao tempo de processo e pode ser entendido como o tempo, em minutos, equivalente ao processamento térmico levado à temperatura constante de referência. O valor $F_{processo}$ é comumente empregado na avaliação da segurança de processos térmicos frente ao microrganismo alvo e é dado pela Equação (2.3): (FRYER; ROBBINS, 2005)

$$F_{processo} = \int_0^t 10^{\frac{T(t)-T_{REF}}{Z_m}} dt \quad (2.3)$$

onde $F_{processo}$ é letalidade integral, T é temperatura no centro geométrico do alimento, T_{ref} é a temperatura de referência do microrganismo alvo e Z_m é a constante de resistência térmica do microrganismo alvo. A temperatura, em função do tempo, é obtida através do perfil de penetração de calor no centro geométrico do alimento.

O processo é, então, considerado seguro se $F_{processo} \geq F_{Tref}$, ou seja, se um processo de $F_{processo}$ minutos for equivalente ou superior à F_{Tref} minutos de um processo à temperatura T_{ref} . Outra forma de se avaliar o processamento térmico é calcular o número de reduções decimais, γ , que tal processo ocasiona sobre determinado microrganismo. O número de reduções decimais ocasionado é dado por:

$$\gamma = \frac{F_{processo}}{D_{Tref}} = \log n_0 - \log n_f \quad (2.4)$$

A estimativa de valores F foi proposta, pela primeira vez, por Ball, citado por Fryer e Robbins (2005), no processamento de alimentos enlatados de baixa acidez ($pH < 4,5$). Sob estas condições, foi empregada a temperatura de referência de 121°C e $Z=10^\circ\text{C}$, com base no processo de inativação do *Clostridium botulinum*, cujos esporos são muito resistentes ao calor e produzem uma toxina muito potente. O processo foi, então, considerado seguro se o ponto mais frio da lata atingisse um valor de $F_{121^\circ\text{C}}$ de 3 minutos, ocasionando 12 reduções decimais. (FRYER; ROBBINS, 2005).

2.3.2 Requisitos Sensoriais

A aparência do produto é um dos primeiros aspectos com o qual o consumidor irá interagir. Em nível comercial, a qualidade do produto final é julgada por duas propriedades que são afetadas e controladas pelo processamento térmico: a cor e o conteúdo de umidade. (YONG; EMERY; FRYER,2002). A cor, como aspecto da aparência, é um fator primário na aceitabilidade entre os consumidores, pois cria a expectativa sobre a qualidade do produto. Se a cor é inaceitável diante das expectativas do consumidor, os outros dois maiores atributos de qualidade, textura e *flavor*, não são, provavelmente, julgados de forma correta. (FRANCIS, 1995). Avaliações das propriedades sensoriais durante a cocção permitem melhor controle do processo e o conduzem de forma a garantir um bom controle de qualidade sobre o produto final.

O escurecimento de produtos de panificação, durante a cocção, está relacionado a dois fenômenos: a reação de *Maillard*, que corresponde a uma reação não enzimática que envolve, principalmente, a presença de açúcares redutores e aminoácidos sob a ação de calor, com formação de melanoidinas, e a caramelização, que ocorre quando açúcares ou certos ácidos são submetidos a altas temperaturas. A coloração da crosta em produtos de panificação é desenvolvida pela reação de *Maillard* em temperaturas de 150-205°C. (THERDTHAI; ZHOU; ADAMCZAK, 2002). A intensidade da reação de *Maillard* é fortemente influenciada pela temperatura e conteúdo de umidade do produto, ambas afetadas pelas condições de aquecimento. Raramente a coloração de produtos de panificação é uniforme sobre toda sua superfície. Assim, quaisquer avaliações de cor devem ser realizadas de forma representativa, tanto em relação à proporção da superfície do produto, quanto ao número de amostras analisadas. (YONG; EMERY; FRYER,2002).

Durante a cocção, várias transformações ocorrem na massa à medida que esta é aquecida. A temperatura e a forma como o calor é transferido ao alimento acarretam modificações na sua estrutura. Em grande parte, estas alterações devem-se a intensidade da perda de água pela superfície. Além disso, em produtos de panificação, três importantes fenômenos, durante a cocção, são responsáveis pela qualidade do produto: a gelatinização do amido, coagulação das proteínas e a geração de gás com expansão da massa. (PATEL; WANISKA; SEETHARAMAN, 2005).

À medida que a temperatura da massa aumenta, os grânulos de amido começam a inchar (por volta dos 60°C) e absorver água. Os grânulos de amido estão, originalmente, na forma cristalina e têm forma arredondada. Próximo dos 65-75°C, a absorção da água pelos grânulos aumenta rapidamente e uma grande quantidade de amilose é liberada, iniciando a gelatinização do amido. O grânulo passa da forma cristalina à forma amorfa. Nesse mesmo intervalo de temperatura, ocorre a desnaturação do glúten e a geração de gás e expansão

da massa. Com a desnaturação e coagulação do glúten, a cerca de 80°C, a estrutura se solidifica, perdendo a capacidade para reter o gás. A crocância e a maciez do produto estão relacionadas à temperatura e ao teor de água do produto. Em um meio com conteúdo elevado de água, os grânulos a absorvem mais facilmente que em meios com baixo conteúdo. Em um meio com baixo conteúdo de água, o inchamento dos grânulos será, assim, retardado ou limitado e ocorrerá a temperaturas mais elevadas. Com taxas de aquecimento mais elevadas, os grânulos têm menos tempo para absorver a água, o que pode retardar ou limitar seu inchamento. (THORVALDSSON et al.,1999).

Thorvaldsson et al. (1999) estudaram os efeitos do conteúdo de água e da taxa de aquecimento sobre as propriedades reológicas e sobre a estrutura de uma massa feita a partir de farinha e água. Segundo os autores, a migração da água no interior da massa pode resultar em diferenças na estrutura da massa em determinadas regiões. Os autores evidenciaram que as amostras aquecidas a taxas mais elevadas apresentaram menores poros em sua estrutura que aquelas aquecidas a taxas menores. O conteúdo de água também afetou a porosidade da amostra. Amostras com baixo conteúdo de água resultaram em poros menores que aquelas com alto conteúdo de água. O aquecimento lento das amostras com maior conteúdo de água produziu os maiores poros, enquanto o aquecimento rápido das amostras com baixo conteúdo de água, produziu os menores poros.

As amostras aquecidas rapidamente foram também as que apresentaram as maiores cargas máximas suportadas nos testes de deformação. As amostras com baixo conteúdo de água e aquecidas lentamente suportaram cargas máximas maiores que as amostras com alto conteúdo de água, aquecidas à mesma taxa de transferência de calor. Isso indica que os poros maiores diminuem a habilidade da amostra em suportar uma alta carga sem se quebrar. (THORVALDSSON et al.,1999).

Em amostras aquecidas mais rapidamente os grânulos não têm tempo suficiente para inchar e gelatinizar como nas outras amostras, podendo afetar a máxima tensão suportada pela amostra.

A energia absorvida pela amostra até a fratura – a tenacidade da amostra - foi afetada pela taxa de aquecimento e, no caso das amostras aquecidas rapidamente, também pelo conteúdo de água.

As amostras aquecidas mais rapidamente absorveram mais energia até atingirem o ponto de fratura. Uma vez que essas amostras são também as que apresentam valores mais elevados para as cargas máximas, é provável que essa habilidade em suportar uma carga alta sem se quebrar seja a responsável pela maior absorção de energia pela amostra. No entanto, para as amostras aquecidas rapidamente, o conteúdo de água também afetou a energia absorvida até a fratura, porém, não afetou a carga máxima suportada sem se

quebrar. Significa que o aumento do conteúdo de água proporciona maior extensibilidade da amostra, indicando a ação da água como um plastificante, conforme proposto por Della Valle et al. (1998), citado por Thorvaldsson et al. (1999).

Em biscoitos, por exemplo, baixas temperaturas e longo tempo de cocção são empregados, fazendo com que a perda de água seja lenta, para que o biscoito não se torne quebradiço. Fahloul et al. (1995) relatam a predominância da radiação neste caso.

Therdthai, Zhou e Adamczak (2002) otimizaram o perfil de temperatura na cocção de pães, de forma a produzir a menor perda de peso durante este processo, mantendo a cor da crosta e a temperatura interna dos pães em uma faixa aceitável, comparados com pães assados em fornos convencionais.

Patel, Waniska e Seetharaman (2005) relataram a influência da taxa de aquecimento, pela mudança das condições de cocção e/ou tamanho da massa, nas propriedades do amido em pães, após sua cocção. Segundo os autores, a alteração da taxa de aquecimento durante a cocção pode alterar a cinética de formação do pão, pelo desordenamento dos cristais de amilopectina, do inchamento dos grânulos de amido e extração da amilose, o que influenciará na estrutura do miolo formada e, conseqüentemente, na textura do produto. As alterações da firmeza do miolo foram avaliadas com o uso de texturômetro; quanto maior a taxa de aquecimento, mais firme se apresentou seu miolo.

Wählb, Skjöldebrand e Junker (2000) estudaram o impacto da injeção direta de vapor no tempo de cocção e qualidade de pães. Durante a cocção, o escurecimento dos pães limitou a qualidade. No forno teste (protótipo do forno usando injeção direta de vapor) melhores resultados foram obtidos para a cor do produto, em comparação ao forno referência (convecção forçada), quando assados à mesma temperatura do ar e pelo mesmo tempo.

2.3.2.1 Análise Sensorial

A análise sensorial é um conjunto de métodos e técnicas que permitem perceber e identificar determinadas características organolépticas (aparência, aroma, sabor, textura) dos alimentos ou objetos, através dos órgãos sensoriais (visão, olfação, gustação, audição e tato). Tem como objetivo avaliar a aceitação de produtos, pesquisando gostos e preferências de consumidores, bem como, diferenciar e/ou quantificar determinados atributos do produto analisado. (TEIXEIRA; MEINERT; BARBETTA, 1987).

A análise sensorial é um campo muito importante da Ciência dos Alimentos e uma ferramenta imprescindível para a indústria alimentícia. É amplamente aplicada na avaliação e seleção de matérias-primas, no desenvolvimento de novos produtos ou processos,

reformulação de produtos já estabelecidos no mercado, melhoramento de processos existentes, estudo de vida de prateleira de produtos, determinação de diferenças e similaridades apresentadas entre produtos concorrentes, identificação das preferências dos consumidores por um determinado produto, bem como otimização e melhoria da qualidade de produtos. (TEIXEIRA; MEINERT; BARBETTA, 1987).

Os instrumentos de medição utilizados para avaliar características sensoriais de alimentos são programados e freqüentemente calibrados para analisarem determinadas propriedades, por exemplo: viscosímetro, colorímetro, olfato e língua eletrônica, texturômetro, etc. No entanto, estes instrumentos avaliam o parâmetro apenas quantitativamente, sem poder expressar qualquer avaliação em relação às preferências do consumidor .

O homem tem habilidade natural para comparar, diferenciar e qualificar os atributos sensoriais e a análise sensorial utiliza-se dessa habilidade para avaliar alimentos e bebidas, empregando a metodologia apropriada aos objetivos do estudo e o tratamento estatístico dos dados obtidos.

Para alcançar o objetivo específico de cada análise, são elaborados métodos de avaliação diferenciados, visando à obtenção de respostas desejadas. Esses métodos apresentam características que se moldam com o objetivo da análise. O resultado, que deve ser expresso de forma específica, conforme o teste aplicado, é estudado estatisticamente concluindo assim a viabilidade do produto ou processo. (CAYOT, 2007).

O planejamento dos testes deve ser realizado adequadamente, por meio do qual será escolhido o melhor delineamento para se obter as informações desejadas. Este delineamento consistirá no tipo de teste a ser aplicado, número ideal de juizes e tipo de análise estatística executável.

2.3.2.1.1 Métodos Sensoriais

Os métodos de análise sensorial podem ser subdivididos em: analíticos e afetivos e são classificados segundo a ABNT – NBR 12994. Os métodos analíticos são classificados em discriminativos e descritivos, sendo que no primeiro são utilizadas a comparação pareada, duo-trio, comparação múltipla, triangular ou ordenação para se avaliar as diferenças sensoriais entre dois ou mais produtos. Nos métodos descritivos, avalia-se a intensidade dos atributos sensoriais do produto utilizando-se o perfil de sabor, textura e a análise descritiva quantitativa, sendo que para a realização destes testes há a necessidade de uma equipe treinada. Para a aplicação dos métodos afetivos não há a necessidade de equipe treinada. O objetivo destes métodos é avaliar a aceitação e preferência dos

consumidores em relação ao produto; este teste pode ser classificado em comparação pareada, escala do ideal, ordenação e escala hedônica.(ABNT – NBR 12994, 1993).

Entre os métodos sensoriais disponíveis para se avaliar a aceitação e preferência dos consumidores com relação a um ou mais produtos, a escala hedônica e a escala-do-ideal são provavelmente as mais utilizadas devido à confiabilidade e validade de seus resultados, bem como sua simplicidade em ser utilizada pelos provadores.

A escala hedônica avalia quanto o julgador gostou ou desgostou de uma determinada amostra. Esta escala é flexível e apresenta uma faixa de aplicação bastante ampla, desde que se avalie a situação com algum critério de preferência humana. É amplamente usada para julgadores não treinados. Usualmente emprega-se a escala hedônica verbal estruturada de 9, 7 ou 5 pontos, atribuindo o valor 1 para desgostei muitíssimo e o valor 9, 7 ou 5 para gostei muitíssimo. (TEIXEIRA; MEINERT; BARBETTA, 1987).

Na escala-do-ideal, a equipe de provadores avalia as amostras e registra suas respostas em escala específica, o quão ideal estas amostras encontram-se em relação ao atributo que se deseja avaliar (por exemplo doçura, textura, sabor). É uma escala estruturada e verbal, indo de “extremamente inferior ao ideal” a “extremamente superior ao ideal”, o ponto central desta escala corresponde ao “ideal”.

Além da escala hedônica e da escala-do-ideal, o teste de ordenação é amplamente utilizado. Classifica-se tanto como um método discriminativo, quando é aplicado para diferenciar qualitativamente e/ou quantitativamente um produto de outro, quanto em método subjetivo, quando expressa a preferência do julgador em relação a uma determinada característica. As amostras são apresentadas ao mesmo tempo aos julgadores e, estes devem ordená-las em ordem crescente ou decrescente, de acordo com a preferência ou intensidade de característica que está sendo julgada.

Os dados obtidos em um teste de aceitação utilizando a escala hedônica são submetidos a uma análise de variância (ANOVA) seguida de outros procedimentos estatísticos, dentre os quais o teste de Tukey, que permite verificar se há diferença significativa entre duas médias, a um dado nível de confiança, normalmente 95%.

Outra forma de se avaliar os resultados da escala hedônica e também da escala do ideal é a análise da distribuição de freqüências dos valores hedônicos obtidos por cada amostra, através de histogramas. Os histogramas tornam possível a visualização da segmentação dos valores hedônicos de cada amostra, revelando o nível de aceitação e rejeição da mesma e permitindo a comparação dos desempenhos de duas ou mais amostras que participaram do estudo.

A codificação da amostra deve ser feita de modo a não induzir as classificações, sendo, por isso, desaconselhável o uso de numeração simples (1, 2, 3..) ou por letras (a, b, c..), pois se pode induzir a classificar a mostra “1” ou “a” como melhor. O recomendado é a utilização de código feito com três dígitos aleatoriamente (452, 604, etc) para cada amostra. (TEIXEIRA; MEINERT; BARBETTA, 1987).

A análise sensorial é medida por meio das reações pessoais dos juízes (avaliadores), por isso existe certa vulnerabilidade dos resultados a essas reações. Para minimizar esse tipo de interferência pessoal na análise, a aplicação dos testes deve ser cercada de cuidados, a fim de evitar os erros.

2.4 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

O conhecimento das propriedades termofísicas de alimentos é fundamental no projeto e na análise de processos ou equipamentos envolvendo transferência de calor, bem como, na modelagem matemática e na simulação numérica da transferência de calor nestes produtos, especialmente quando a qualidade e segurança do alimento assim como o custo operacional estão sob consideração. A temperatura no centro de produtos como salsichas, por exemplo, deve ser mantida acima de 72°C, na fase final de aquecimento, e abaixo de 15°C, no final do resfriamento, garantido assim, estabilidade microbiológica do produto. Uma forma de avaliar as características de aquecimento do alimento é pelo conhecimento de suas propriedades termofísicas. (TAVMAN; KUMCUOGLU, 2002; AKTERIAN,1997).

Durante a cocção de produtos de panificação, dois processos inter-relacionados ocorrem simultaneamente. Calor é transferido para o alimento, causando alterações em sua estrutura, desnaturação das proteínas, gelatinização do amido etc. Simultaneamente, ocorre transferência de massa, pela migração da umidade do interior do produto à superfície, e a evaporação. Devido à evaporação desta umidade e à expansão da massa, a densidade e o conteúdo de água mudam durante a cocção.

A composição e, principalmente, o conteúdo de água presente no alimento, afetam as propriedades termofísicas de alimentos. A condutividade térmica tem forte dependência da temperatura, especialmente em temperaturas acima das quais ocorrem mudanças de fase. De acordo com Karunakar et al. (1998), citado por Marcotte, Taherian, e Karimi (2008), em temperaturas na faixa de 0-40°C a condutividade térmica não apresenta diferença significativa em seus valores. Em temperaturas maiores, no entanto, a condutividade aumenta com o aumento da temperatura. (MARCOTTE; TAHERIAN; KARIMI, 2008).

Informações a respeito das propriedades termofísicas de massas e produtos de panificação durante a cocção são escassos, se comparados a outros produtos.

Existem vários métodos disponíveis para se medir propriedades termofísicas. Entre esses métodos podem-se citar os aplicados para condições de regime permanente, como método da placa quente, calorimetria de exploração diferencial (DSC) e os aplicados em condições de regime transiente, como os métodos da fonte linear de aquecimento, do histórico de temperatura e da faixa quente. (BAIK et al., 2001).

As propriedades termofísicas que têm fundamental importância na transferência de calor em alimentos são: difusividade térmica, condutividade térmica, calor específico e densidade. Para alimentos líquidos, estas propriedades estão disponíveis na literatura ou podem ser preditas com uma boa precisão. Em alimentos estruturados, como é o caso da pizza, devido a sua heterogeneidade, torna-se mais difícil a predição destas propriedades. Portanto, medidas experimentais são especialmente importantes para esta classe de produtos. Em tais produtos, as propriedades termofísicas essencialmente medidas ou estimadas são: difusividade térmica efetiva e condutividade térmica efetiva, responsáveis pela condução global de calor através de sua estrutura. (QUEIROZ, 2001; TAVMAN; KUMCUOGLU, 2002).

A seguir serão descritos os principais métodos para determinação da difusividade efetiva, condutividade efetiva e densidade aparente em alimentos.

2.4.1 Difusividade térmica

A difusividade térmica determina o quão rápido o calor se propaga através de um material. Relaciona a habilidade que um material apresenta em conduzir e armazenar energia e é definida como a razão entre a condutividade térmica (k) e o produto do calor específico (c_p) e pela densidade (ρ).

$$\alpha = \frac{k}{\rho \times c_p} \quad (2.5)$$

Materiais com alto valor de difusividade térmica respondem rapidamente a mudanças térmicas em seu ambiente, enquanto materiais com pequenos valores de difusividade respondem mais lentamente, demorando a alcançar um novo estado de equilíbrio. (INCROPERA; DEWITT, 1998).

A difusividade térmica é uma importante propriedade de transporte, necessária na modelagem e nos cálculos de transferência de calor transiente em operações básicas de processamento de alimentos, como a secagem, o processamento térmico, o resfriamento e o congelamento. A difusividade térmica de um material é influenciada pelo conteúdo de água, pela temperatura, pela composição e pela porosidade. Em geral, no processo de

coção de produtos de panificação, o conteúdo de água e a temperatura do produto podem variar consideravelmente, afetando os valores dessa propriedade. (QUEIROZ, 2001).

Martens (1980), citado por Queiroz (2001), investigou a influência da água, da gordura, da proteína, do carboidrato e da temperatura na difusividade térmica de alimentos. A variação da fração de gordura, de carboidrato e de proteína teve uma pequena influência sobre a difusividade térmica, enquanto a temperatura e o conteúdo de água foram os fatores de maior influência sobre esta propriedade.

Sweat (1986), citado por Rao e Rizvi (1994), recomenda a determinação da difusividade térmica através de valores de condutividade térmica, calor específico e densidade mássica, obtidos experimentalmente e empregados na Equação (2.5). No entanto, esta abordagem requer tempo considerável e instrumentação elaborada. Outra abordagem é empregar experimentos que permitam a medida direta da difusividade térmica. (BAIK et al., 2001).

A literatura apresenta vários modelos empíricos úteis na predição da difusividade térmica de alimentos, porém, a maioria destes é específica ao produto estudado. Martens (1980), citado por Queiroz (2001), realizou regressões múltiplas em 246 valores de difusividade térmica em alimentos, publicados na literatura, obtendo uma equação em função do conteúdo de água (w) e da temperatura (T), com erro padrão de $1,4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$:

$$\alpha = [0,057363w + 0,00028(T + 273)].10^{-6} \quad (2.6)$$

Riedel (1969), citado por Kostaropoulos e Saravacos (1997), desenvolveu uma expressão que incorpora uma gama ampla de alimentos e fornece valores de difusividade térmica em função do conteúdo de água (w) e da difusividade térmica da água (α_w), em uma determinada temperatura:

$$\alpha = 0,088.10^{-6} + (\alpha_w - 0,088.10^{-6})w \quad (2.7)$$

Para alimentos porosos e grãos, a difusividade térmica não pode ser predita adequadamente por simples modelos aditivos, baseados somente na composição. Zaroni, Peri e Gianott (1995) observaram que a difusividade térmica do pão aumentou consideravelmente com o aumento da porosidade.

A difusividade térmica em alimentos pode ser estimada com base na solução analítica da equação de Fourier para uma determinada geometria, por diferentes métodos, dentro os quais cita-se: aplicação da técnica iterativa da estimação dos mínimos quadrados, uso de curvas de penetração de calor, uso de cartas de tempo-temperatura e uso de soluções analíticas.

2.4.1.1 Estimação dos mínimos quadrados

A determinação da difusividade pela *estimação dos mínimos quadrados* pode ser feita através do histórico de temperatura registrada no centro de um objeto de geometria definida. Uma solução analítica da equação diferencial parcial, apropriada para esta geometria, é programada em um computador para prever a temperatura de vários tempos para alguns valores arbitrariamente selecionados da difusividade térmica. As equações diferenciais parciais da condução de calor (Equação de Fourier), para a placa plana infinita (Figura 2.5a) e para o cilindro infinito (Figura 2.5b) são dadas, respectivamente, pelas equações (2.8) e (2.9):

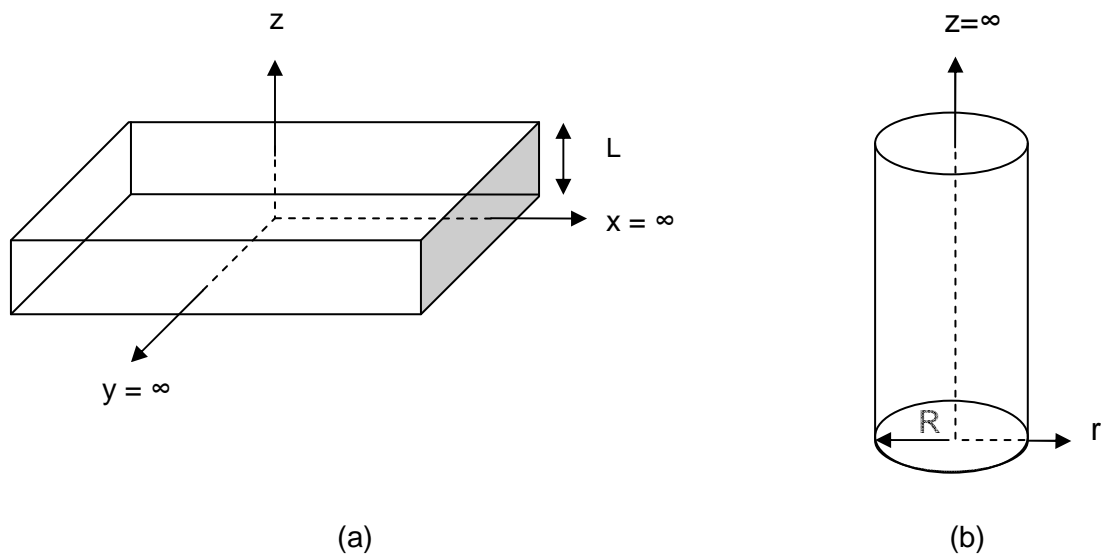


Figura 2.5 – (a) Placa plana infinita e (b) cilindro infinito.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (2.9)$$

onde x , y e z são as coordenadas cartesianas e r é a coordenada radial. T é a temperatura da amostra, t é o tempo e α é a difusividade térmica do material. L é a espessura da placa e R é o raio do cilindro.

Com o uso de técnicas iterativas, o valor da difusividade térmica pode ser alterado até que a diferença entre os valores da difusividade térmica predita e do valor experimental se torne estatisticamente desprezível. É essencial, nesta técnica, que as condições de

contorno usadas na solução da equação governante sejam estritamente seguidas no experimento real. Este método é bastante utilizado na determinação da difusividade de produtos de panificação. Geralmente, na determinação das propriedades térmicas, é necessária a definição das dimensões características do material. Em alguns casos é possível, e até desejado, que se preparem as amostras do produto em compartimentos com geometria conhecida, feitos de materiais que apresentem alta condutividade térmica. (MOHSEIN, 1978).

Considerando uma placa plana infinita e um cilindro infinito sujeitos às seguintes condições inicial e de contorno:

condição inicial:

$$T = T_0 \quad t = 0 \quad (2.10)$$

condições de contorno:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad t > 0; z = 0 \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad t > 0; r = 0 \quad (2.11)$$

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L/2} = h(T - T_\infty) \quad t > 0; z = L/2 \quad k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h(T - T_\infty) \quad t > 0; r = R \quad (2.12)$$

a distribuição de temperaturas é dada por: (INCROPERA; DEWITT 1998)

$$\left. \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \right|_{\text{placaplana}} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4 \operatorname{sen} \mu_m}{2\mu_m + \operatorname{sen}(2\mu_m)} \exp\left(-\mu_m^2 \frac{4\alpha t}{L^2}\right) \cos(\mu_m z) \quad (2.13)$$

$$\left. \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \right|_{\text{cilindro infinito}} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \exp(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}) \quad (2.14)$$

Um cilindro finito pode ser obtido da combinação das Figura 2.5 (a) e (b), conforme mostra a Figura 2.6.

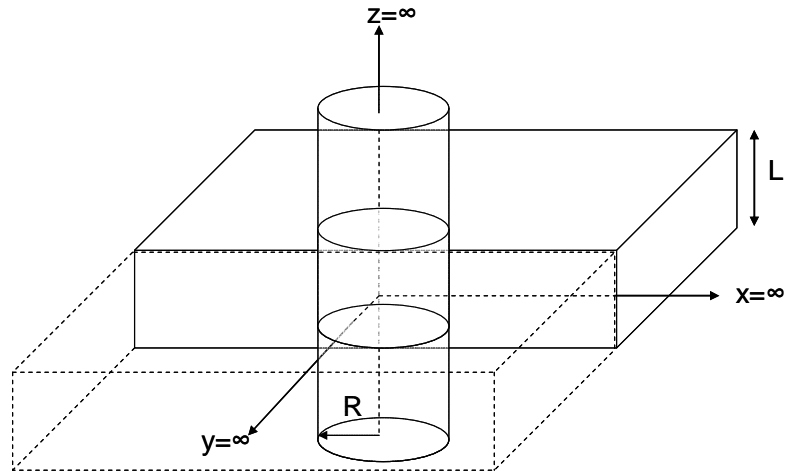


Figura 2.6 – Cilindro finito formado pela junção da placa plana infinita e de um cilindro infinito.

O perfil de temperaturas em um cilindro infinito pode, então, ser obtido pela combinação das Equações (2.13) e (2.14), e pelo emprego da regra de Newman: (CARSLAW; JAEGER, 1959)

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \Big|_{\text{cilindro finito}} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \text{sen} \mu_m}{2\mu_m + \text{sen}(2\mu_m)} \cos(\mu_m z) \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \exp\left(-\left(\frac{4\mu_m^2}{L^2} + \frac{\mu_n^2}{R^2}\right) \alpha t\right) \quad (2.15)$$

onde T_0 e T_∞ são, respectivamente, as temperaturas inicial da amostra e ambiente; R é o raio do cilindro; r , a coordenada radial; z , a distância entre o ponto de medida da temperatura e o centro geométrico do cilindro; L é o comprimento do cilindro; μ_n , as raízes positivas da equação transcendental $\mu_n \frac{J_1(\mu_n)}{J_0(\mu_n)} = Bi$; μ_m , as raízes positivas da equação transcendental $\mu_m \tan \mu_m = Bi$; J_0 e J_1 são as funções de Bessel de primeiro tipo e ordem 0 e 1; α , a difusividade térmica e t , o tempo.

2.4.1.2 Uso de curvas de penetração de calor

Dickerson (1965), citado por Moshenin (1978), descreveu um aparato experimental para a determinação da difusividade térmica de alimentos, conforme ilustra a Figura 2.7. O método baseia-se na evolução temporal de temperaturas no centro da amostra e a temperatura do meio de aquecimento. O aparato utilizado consiste em um banho de água

mantido sob agitação e aquecido a uma taxa constante, no qual um cilindro, confeccionado em material de alta condutividade térmica, contendo a amostra é imerso.

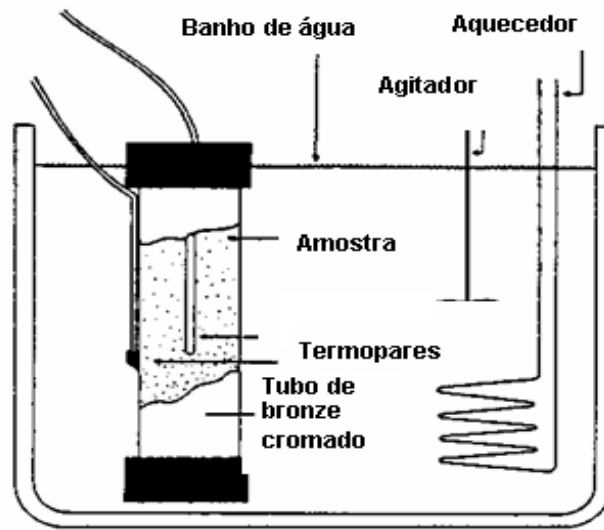


Figura 2.7 – Aparato experimental para determinação da difusividade térmica, DICKERSON (1965).

O cilindro foi considerado de comprimento infinito e o fluxo de calor axial desprezível. Em condições em que a taxa de aquecimento é constante, a equação de Fourier quando existir apenas gradiente radial de temperatura, é dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = H = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.16)$$

onde H é a taxa de aquecimento constante em todos os pontos da superfície do cilindro.

Como o gradiente $\partial T / \partial r$ não é mais dependente do tempo, a equação acima pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = \frac{H}{\alpha} \quad (2.17)$$

cuja solução é:

$$T = \frac{Hr^2}{4\alpha} + C_1 \ln(r) + C_2 \quad (2.18)$$

Sob tais condições, as condições iniciais e de contorno são:

$$\begin{aligned} T = H \times t = T_R = T_\infty & & t > 0; r = R \\ \frac{dT}{dt} = 0 & & t > 0; r = 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

onde T_R é a temperatura na parede do cilindro que é igual à temperatura do meio de aquecimento agitado, no qual o cilindro é submerso, T_∞ . R é o raio do cilindro.

De forma que a Equação (2.18) toma a forma:

$$T_\infty - T = \frac{H}{4\alpha}(R^2 - r^2) \quad (2.20)$$

Em $r = 0$,

$$T_\infty - T_c = \frac{HR^2}{4\alpha} \quad (2.21)$$

O método se baseia na obtenção da diferença entre a temperatura no centro da amostra (T_c) e a temperatura no meio de aquecimento (T_∞), após certo período. O gráfico da temperatura em função do tempo apresenta uma região curvilínea no início do processo, seguida de uma parte linear. A taxa de aquecimento, H , é numericamente igual à inclinação dessa parte linear da curva, sendo seu valor utilizado para o cálculo da difusividade térmica.

DICKERSON (1965) mostrou que 95% ou mais da máxima diferença de temperatura ($T_\infty - T_c$), ou seja, o estabelecimento do estado estacionário, tem lugar quando:

$$Fo = \frac{\alpha t}{R^2} > 0,55 \quad (2.22)$$

O perfil de temperatura em um cilindro finito pode ser, ainda, obtido pela simplificação da Equação (2.41). Para valores de número de Fourier maiores ou iguais a 0,2, as soluções das séries desta equação convergem rapidamente. O perfil de temperatura pode ser, assim, aproximado pelo primeiro termo da série. Dessa forma, com $m = n = 1$ tem-se $\mu_m = \pi/2$, $\mu_n = 2,4048$ e $J_1(2,4048) = 0,5191$, e considerando-se, ainda, o centro geométrico do objeto cilíndrico, $z = 0$, $r = 0$ e $J_0(0) = 1,0$, a Equação (2.15) é simplificada à:

$$\frac{T_c - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = 2,0396 \exp \left[- \left(\frac{\pi^2}{L^2} + \frac{2,4048^2}{R^2} \right) \alpha t \right] \quad (2.23)$$

onde: T_0 , T_c , T_∞ são as temperaturas inicial da amostra, do centro da amostra e do ambiente, respectivamente. R é o raio do cilindro e L , o seu comprimento.

Segundo Nix et al. (1967), citado por Queiroz (2001), um cilindro finito pode ser considerado um sólido infinito se a razão entre o seu comprimento e o seu diâmetro for igual ou superior a quatro.

Muitos pesquisadores têm determinado a difusividade térmica, sob várias condições, aplicando a solução apresentada na Equação (2.23), para curvas de aquecimento ou resfriamento de corpos de diferentes geometrias. O método proposto por Ball e Olson (1957), citado por Carbonera et al. (2003), usa a evolução da diferença entre a temperatura transiente em uma posição central da amostra e a temperatura do meio de aquecimento, em função do tempo. Na aplicação deste método, é necessário que a temperatura do meio de aquecimento, T_∞ , seja constante durante todo o processo. O gráfico do logaritmo $\log[(T_c - T_\infty)/(T_0 - T_\infty)]$, em função do tempo, apresenta também uma parte curvilínea no início do processo térmico, seguida de uma parte linear. A inclinação, m , da parte linear pode ser usada para determinar a taxa de aquecimento da amostra, f_h , por meio da equação:

$$m = -\frac{1}{f_h} \quad (2.24)$$

A taxa de aquecimento, determinada experimentalmente, é relacionada à difusividade térmica, para uma geometria cilíndrica, pela equação de BALL e OLSON, através da equação:

$$f_h = \frac{2,303}{\left(\frac{5,783}{R^2} + \frac{9,87}{L^2} \right) \alpha}, \quad (2.25)$$

em que R e L são o raio e a altura do cilindro, respectivamente, e α é a difusividade térmica.

Caso o comprimento do cilindro seja considerado infinito ou suas faces inferior e superior sejam isoladas termicamente, de forma que o fluxo de calor axial seja desprezível, a Equação (2.25) é simplificada para:

$$f_h = \frac{2,303}{\left(\frac{5,783}{R^2} \right) \alpha} \quad (2.26)$$

Muitos pesquisadores aplicaram soluções para curvas de aquecimento ou resfriamento de corpos de diferentes geometrias sob várias condições e determinaram a difusividade térmica de diversos materiais. Queiroz (2001) estimou a difusividade térmica efetiva do pão francês, durante a cocção a 200°C, e obteve o valor médio de $4,51 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Tavman e Kumcuoglu (2002) determinaram a difusividade da massa de pizza em função da temperatura, entre -30 e 12°C. Para a temperatura de 10°C, a difusividade efetiva estimada foi de $1,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Já Carciofi et al. (2002) determinaram a difusividade efetiva da mortadela através das curvas de penetração de calor e da estimação dos mínimos quadrados.

2.4.1.3 Uso de soluções analíticas

Se o número de Fourier for maior ou igual a 0,2, a temperatura medida experimentalmente em um determinado local da amostra pode ser utilizada para a determinação de sua difusividade térmica, com a aplicação da Equação (2.15) para geometrias cilíndricas. (QUEIROZ, 2001).

2.4.1.4 Uso das cartas tempo-temperatura

Os resultados obtidos com a aplicação da solução analítica para um cilindro finito, dada pela Equação (2.15), podem ser convenientemente apresentados em formas gráficas que ilustram a dependência funcional da distribuição de temperatura transiente nos números de Biot e Fourier. (INCROPERA; DEWITT, 1998).

Um experimento de aquecimento ou resfriamento pode ser realizado de forma que o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície da amostra, h , seja bastante grande, se comparado com a condutividade térmica da amostra, de forma que $\frac{k}{hr} \approx 0$, ou seja, que o número de Biot, que é dado pela seguinte expressão, tenda ao infinito:

$$\text{Bi} = \frac{L_c/k}{1/h} = \frac{hL_c}{k}, \quad (2.27)$$

onde L_c é a dimensão característica, k é a condutividade térmica da amostra e h o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o meio de aquecimento e a superfície da amostra.

As soluções gráficas, chamadas também de cartas tempo-temperatura, estão disponíveis na literatura, fornecendo o número de Fourier em função da temperatura adimensional para diferentes geometrias:.

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \quad (2.28)$$

Sob tais condições, conhecendo-se a temperatura adimensional em um determinado momento, as cartas tempo-temperatura podem ser usadas para estimar o número de Fourier:

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_c^2}, \quad (2.29)$$

e a difusividade térmica da amostra, estimada pelo emprego desta expressão.

2.4.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma propriedade do material que descreve a taxa com que o fluxo de calor escoar sob a influência de um gradiente de temperatura. É a medida da habilidade que tem um material em conduzir calor e pode ser predita pela Lei de Fourier da condução de calor, conforme segue: (SWEAT, 1986, apud RAO; RIZVI, 1994)

$$q = -k A \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.30)$$

onde q é a taxa de calor, A é a área de transferência de calor normal ao fluxo de calor, k é a condutividade térmica, $\frac{\partial T}{\partial x}$ é o gradiente de temperatura ao longo da direção do fluxo de calor.

A condutividade térmica é uma das mais importantes propriedades térmicas de alimentos necessárias na análise da transferência de calor durante o processamento, bem como na modelagem matemática. Em alimentos, a condutividade térmica depende, principalmente, da composição química. A estrutura ou arranjo físico da amostra influenciam nos valores de condutividade térmica, bem como qualquer outro fator que afete o fluxo de calor passando através do alimento (espaços vazios, orientação de fibras, etc). Além desses fatores, o aumento da temperatura em produtos alimentícios pode causar várias mudanças em suas propriedades físicas e químicas e, assim, afetar a condutividade térmica. Segundo Queiroz (2001), a relação da condutividade térmica com o conteúdo de água é uma das

mais importantes na modelagem matemática e simulação computacional de processos em que há transferência de massa e energia simultaneamente.

Muitos modelos têm sido propostos para prever as propriedades térmicas de alimentos nas condições desejadas, mas nenhum deles pode ser usado para uma grande diversidade de alimentos. No entanto, a proposta da maioria é baseada na composição química, temperatura e características físicas. Características físicas englobam a densidade, percentual de espaços vazios, tamanho e configuração desses espaços e qualquer outro aspecto físico que influencie no fluxo de calor que passa pelo alimento. A composição química diz respeito às quantidades de carboidrato, proteína, gordura, cinzas, fibra, água e ar. A predição das propriedades térmicas baseadas na composição é razoavelmente aceitável, pois quaisquer mudanças ocorridas no alimento, durante o processamento, refletirão na sua composição. Uma exceção é quando o processamento altera as características do próprio componente, como é o caso do efeito da temperatura na desnaturação da proteína e na gelatinização do carboidrato ou a produção de gelo, quando submetido a baixas temperaturas. Os modelos podem, assim, incorporar a dependência do tempo e da temperatura da condutividade, em vez de utilizar valores médios para todo o processo. Para prever a distribuição de temperatura e água no produto, durante a cocção, o conhecimento de suas propriedades, entre elas, da condutividade térmica em função das condições de cocção, é necessária. (SABLANI; BAIK e MARCOTE, 2001).

BAIK et al. (2001) revisaram técnicas utilizadas na determinação das propriedades térmicas de produtos de panificação, bem como, modelos para a predição direta dessas propriedades em um determinado alimento ou em seus componentes, em função da temperatura.

Expressões genéricas do modelo de propriedades térmicas de alimentos, que envolve uma somatória das propriedades térmicas de cada um de seus componentes (X_i), é dada pelas equações a seguir:

$$c_p = \sum X_i c_{pi} \quad (2.31)$$

$$k = \sum X_i k_i \quad (2.32)$$

$$\rho = \frac{1}{\sum (X_i / \rho_i)} \quad (2.33)$$

Para a maioria dos alimentos líquidos e muitos alimentos sólidos, uma equação aditiva baseada no conteúdo de água, proteína, carboidrato, gordura e cinzas, parece ser adequada. Essas equações são válidas para uma pequena faixa de temperatura, pois o termo da temperatura não é levado em conta nessas equações. (BAIK et al.,2001). O

modelo em série para o calor específico, densidade e difusividade térmica tem sido empregado com sucesso para muitos produtos alimentícios, incluindo os porosos, como é o caso dos produtos de panificação. No entanto, a predição da condutividade térmica de alimentos porosos através de modelos aditivos apresenta algumas dificuldades relativas à fração de ar contida nesses alimentos. Os resultados obtidos adicionando-se o ar como um dos componentes nessas equações não são satisfatórios, segundo Rao e Rizvi (1994).

Como a maioria dos alimentos contém um conteúdo relativamente grande de água, determinar a condutividade térmica com base nesse componente tem sido outro método usado em algumas aplicações práticas. (MOHSENIN, 1978).

Existem numerosas técnicas experimentais para determinar-se a condutividade térmica de produtos alimentícios. Essas técnicas são divididas em dois grandes grupos: as técnicas de medição em estado estacionário e as em estado transiente. Em algumas dessas técnicas, enquanto a condutividade térmica está sendo medida, a difusividade e o coeficiente de transferência de calor por convecção também podem ser obtidos, diretamente ou por cálculos. (MOHSENIN, 1978).

Apesar de empregar equações matemáticas simples, os métodos em estado estacionário apresentam as seguintes desvantagens: o longo tempo para atingir o estado estacionário; a necessidade de geometria definida da amostra; a eventual migração de umidade da amostra devido ao longo tempo e, no caso de materiais com alto conteúdo de água, a presença do mecanismo de convecção. (QUEIROZ, 2001; RAO; RIZVI, 1994). Segundo Baik et al. (2001), esses métodos não são indicados para medidas de condutividade térmica de produtos de panificação.

As técnicas empregadas sob estado transiente são muito mais simples que aquelas em estado estacionário. Para amostras secas, a precisão dos resultados obtidos por métodos em estado transiente, no entanto, não é tão boa quanto aqueles obtidos por métodos em estado estacionário. A maioria dos produtos alimentícios submetidos a processamento térmico contém certa umidade e as técnicas em estado estacionário levam em conta estes fenômenos.

De uma forma geral pode-se afirmar que as técnicas em estado transiente parecem ter mais vantagens que desvantagens para o uso em produtos alimentícios (MOHSENIN, 1978; BAIK et al, 2001). Assim, será dada ênfase às técnicas em estado transiente. Nos métodos transientes a amostra é submetida a um fluxo de calor e a temperatura é medida em um ou mais pontos entre a amostra e sua superfície.

Entre os métodos de medição em estado transiente, o método da sonda linear tem sido amplamente utilizado para a determinação da condutividade térmica de produtos

alimentícios, incluindo produtos de panificação, devido a sua conveniência, rapidez e baixo custo, além de ser adequada para pequenas amostras (BAIK et al, 2001; QUEIROZ, 2001).

2.4.2.1 Método da sonda linear de aquecimento

O método da sonda linear baseia-se na solução matemática de um sistema ideal composto por um fio aquecedor de raio infinitesimal imerso em um meio sólido homogêneo infinito. O meio sólido está, inicialmente, à temperatura uniforme e suas propriedades termofísicas são consideradas constantes. Ao ser inserida na amostra, a sonda é aquecida a uma taxa constante, resultando em uma distribuição de temperatura em coordenadas cilíndricas, dada pela Equação (2.34): (CARSLAW, JAEGER, 1959)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) \quad (2.34)$$

onde T é a temperatura; t o tempo; r o raio do cilindro e α a difusividade térmica. A sonda linear está sujeita à seguinte condição inicial:

$$\text{Em } t=0: \quad T = T_0 \quad , \quad (2.35)$$

e às seguintes condições de contorno:

$$\text{Em } r = 0 : \quad r \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = -\frac{Q}{2 \pi k}, \quad (2.36)$$

$$\text{Em } r = R: \quad -k \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=R} = 0, \quad (2.37)$$

onde T_0 é a temperatura inicial, k é a condutividade e Q é o calor fornecido pela fonte por unidade de comprimento da sonda.

A Equação (2.36) representa o calor fornecido pela fonte no centro da amostra cilíndrica através da sonda e a Equação (2.37) representa a ausência de troca de calor com o ambiente.

As seguintes hipóteses são também requeridas: a fonte de calor (Q) e as propriedades térmicas são constantes, a massa térmica do aquecedor é desprezível e a

condução acontece somente na direção radial. Assim, a solução para a Equação (2.34) é dada por: (CARSLAW; JAEGER, 1959)

$$T = \frac{Q}{4\pi k} \int_{\beta^2}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du, \quad (2.38)$$

onde:

$$u = \frac{d^2}{4\alpha(t-t_0)}, \quad (2.39)$$

e t_0 é o tempo inicial.

O parâmetro β combina matematicamente a duração do teste (t), a difusividade térmica da amostra (α) e a distância do sensor de temperatura da fonte de calor (d) na seguinte expressão:

$$\beta = \frac{d}{2\sqrt{\alpha t}}, \quad (2.40)$$

onde d é a distância entre o fio aquecedor e o ponto de interesse, no caso, o sensor de temperatura. (SWEAT (1986) apud RAO; RIZVI, 1994).

A solução analítica para a Equação (2.38) é: (CARSLAW; JAEGER, 1959)

$$T = -\frac{Q}{4\pi k} E_i[-\beta^2], \quad (2.41)$$

onde $E_i(-\beta^2)$ é a função integral exponencial de primeira ordem, dada por uma série infinita e que pode ser expandida usando-se a seguinte equação:

$$E_i[-\beta^2] = Ce + \ln(\beta^2) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \beta^{2n}}{nn!}, \quad (2.42)$$

onde Ce é a constante de Euler, igual a 0,57721.

Estimativas para a Equação (2.41) podem ser calculadas para diferentes valores de β^2 . No entanto, conforme recomenda Murakami et al. (1996), a Equação (2.42) pode ser simplificada projetando-se o experimento ou a sonda de tal forma que o valor do parâmetro β seja bastante pequeno, ou seja, fazendo-se o raio da sonda o menor possível ou a

duração do teste a mais longa possível. Assim, o termo soma desta equação pode ser desprezado.

A Equação (2.41) pode então ser reescrita da seguinte forma:

$$T = \frac{Q}{2\pi k} \left[-\frac{Ce}{2} - \ln(\beta) \right] + \xi(\beta^2) \quad (2.43)$$

O termo $\xi(\beta^2)$ é o erro de truncamento. No entanto, a equação (2.43) é, em muitos casos, de difícil aplicação prática, pois requer dados de difusividade térmica para o cálculo de β . A fim de simplificá-la, esta a equação é avaliada dentro de um intervalo $(t-t_0)$, o que a reduz à

$$T - T_0 = \frac{Q}{4\pi k} \left[\ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \right] \quad (2.44)$$

O termo t_0 é arbitrariamente escolhido do gráfico logaritmo natural do tempo versus temperatura, mas simplifica a análise de dados, se for ajustado ao tempo correspondente ao ponto no eixo em que a curva começa a tornar-se linear. (MURAKAMI et al., 1996).

O aquecimento da sonda e a temperatura adjacente a ela são monitorados simultaneamente. O aumento de temperatura da sonda está diretamente relacionado à condutividade térmica da amostra. Após um curto período de tempo, a relação entre o aumento de temperatura em regiões próximas à sonda e o tempo torna-se linear em uma curva do logaritmo natural do tempo em função da temperatura. A condutividade térmica é dada por:

$$k = \frac{Q}{4\pi} \frac{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)}{(T - T_0)} \quad (2.45)$$

A proposta do estabelecimento de um tempo inicial, t_0 , é eliminar a necessidade de dados de difusividade térmica da amostra para o cálculo da condutividade térmica, bem como, da parte não-linear da curva $T-t$. O tempo inicial é afetado pelo raio da sonda, a razão entre a massa térmica da amostra e da sonda e a resistência de contato entre elas. A linearização das curvas $T-t$ é feita escolhendo-se t_0 como o tempo em que a porção não-linear dessa curva termina.

A sonda utilizada para a determinação da condutividade térmica consiste de um cilindro confeccionado de material de alta condutividade, com raio pequeno e espessura de parede estreita, de tal forma que a diferença de temperatura na direção radial do material da

sonda seja desprezível. A sonda é provida com uma fonte linear de aquecimento isolada em seu comprimento e com um sensor de temperatura localizado na parte central do comprimento da fonte linear. (RAO; RIZVI, 1994).

A solução da Equação (2.34) assume uma fonte de calor linear, de resistência constante, inserido em um meio homogêneo e temperatura inicialmente uniforme. Sob tais condições, a temperatura em qualquer ponto da sonda será função de várias variáveis, incluindo a condutividade térmica.

No entanto, essa sonda é baseada na solução de um sistema ideal composto por uma fonte linear de aquecimento de capacidade térmica desprezível, imerso em um meio sólido infinito. Essa sonda difere da sonda de aquecimento linear real. Isto deve-se principalmente a sua capacidade térmica e ao seu diâmetro finito. Além disso, a resistência de contato entre a sonda e a amostra, não considerada na Equação (2.45), não pode ser desprezada. Devido às aproximações feitas entre a sonda real e o modelo teórico e as considerações práticas adotadas, existem certos erros experimentais que devem ser considerados na determinação da condutividade térmica. (MOHSENIN, 1978 ; MURAKAMI et al., 1996; ELUSTONDO ; ELUSTONDO; URBICAIN, 2001).

Segundo MURAKAMI et al. (1996), a Equação (2.43) apresenta um erro de truncamento percentual, $\xi_{TR}(\beta^2)$, resultante da simplificação matemática adotada sobre forma não-truncada. Eliminando-se a série infinita da Equação (2.42), a temperatura predita será sempre menor que aquela calculada com a equação não-truncada. Essa diferença diminui à medida que β decresce. Segundo o autor, o erro de truncamento é a razão entre essa diferença e a temperatura calculada com a equação não-truncada e está presente em cada um dos dados de temperatura; seu valor máximo se dá em t_0 e, a partir daí, decresce com o tempo, conforme a equação:

$$\xi_{TR\%}(\beta^2) = \frac{\left(-\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \beta^{2n}}{nn!} \right)}{\left(-Ce - \ln(\beta^2) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \beta^{2n}}{nn!} \right)} \quad (2.46)$$

Esse erro é minimizado calculando-se a condutividade térmica a partir da parte linear da curva do gráfico de T em função de t, bem como minimizando o valor de β (Equação (2.40)), através do uso de sondas de menor tamanho possível ou aumentando o tempo de duração do teste. Vos (1955), citado por Murakami et al. (1996), recomenda um erro de truncamento próximo a 0,59%, o que equivale a β igual a 0,14. Elustondo, Elustondo e Urbicain (2001) propõem, no entanto, que o erro de truncamento seja calculado pela comparação entre a condutividade térmica determinada pela Equação (2.45), k^* , e aquela

determinada pela derivação da Equação (2.41) em relação à $\ln(t)$, ou seja, pela condutividade térmica real da amostra, k . O erro de truncamento segundo esse autor será expresso por:

$$\xi_{\beta} = \frac{k^* - k}{k^*} = 1 - e^{-(\beta^2)} \quad (2.47)$$

Uma tabela contendo valores de erros de truncamento calculados pela Equação (2.46) e pela Equação (2.47), para vários valores de β , é apresentada abaixo.

Tabela 2.3 – Comparação entre o erro de truncamento dado por ξ_{TR} e ξ_{β} .

β	ξ_{TR} (%)	ξ_{β} (%)
0,2	0,006	0,040
0,4	0,027	0,160
0,6	0,071	0,359
0,8	0,143	0,638
0,10	0,247	0,995
0,12	0,390	1,430
0,13	0,478	1,676
0,14	0,578	1,941
0,15	0,691	2,225
0,16	0,817	2,528
0,17	0,958	2,849
0,18	1,114	3,188
0,19	1,287	3,546
0,20	1,477	3,921

Fonte: Elustondo, Elustondo e Urbicain (2001).

Outra fonte de erro na determinação da condutividade térmica, utilizando o método da sonda linear de aquecimento, deve-se à razão entre a capacidade térmica da amostra e a da sonda (M); não levada em conta na Equação (2.45). Carslaw e Jaeger (1959) encontraram a solução matemática para este caso, relacionando o aumento da temperatura em uma sonda infinita com raio finito (r), massa térmica (S) e resistência de contato (R).

$$T = \frac{Q}{2\pi k} \left[C_1 - \ln(\beta\sqrt{C}) - \frac{\beta^2(4C_1 - C_2)}{C_2} - \frac{2\beta^2(C_2 - 2)}{C_2} \ln(\beta\sqrt{C}) + \dots \right] \quad (2.48)$$

onde,

$$C_1 = 2\pi Rk \quad (2.49)$$

$$C_2 = 2\pi r^2 \frac{\rho C_p}{S} \quad (2.50)$$

$$S = \pi r^2 \rho_{\text{sonda}} C_{p_{\text{sonda}}} \quad (2.51)$$

$$C = \exp(Ce) \quad (2.52)$$

Se a resistência de contato for tão pequena que possa ser desprezada, a massa térmica da sonda e da amostra forem iguais ($C_2 = 2$) e o raio da sonda for relativamente pequeno, as Equações (2.43) e (2.48) apresentam resultados iguais.

Segundo Murakami et al. (1996) e Elustondo, Elustondo e Urbicain (2001), a razão entre as capacidades térmicas muda a inclinação da curva T-t, afetando o cálculo da condutividade térmica. A sonda linear de aquecimento consiste, geralmente, em um aquecedor, um sensor de temperatura e um tubo para manter o aparato rígido. Assumindo-se a sonda como uma estrutura sólida, sua capacidade térmica pode ser calculada através das propriedades térmicas dos componentes individuais que a constituem. Se M for igual a 1, seu efeito pode ser desprezado. Uma simulação matemática foi conduzida por Murakami et al. (1996) para avaliar o efeito da razão entre as capacidades térmicas na inclinação da curva T-t. Curvas geradas pela Equação (2.48) para vários valores de M são comparadas à curva gerada pela equação não-truncada da sonda linear de aquecimento (Equação (2.41)), que representa a condição ideal, com M=1 e resistência de contato desprezível. Na região linear, à medida que M cresce, a inclinação da curva decresce e o desvio da inclinação em relação a uma curva de referência aumenta. Esse desvio é remediado com o uso de um fator de calibração diretamente proporcional ao grau do desvio ou preenchendo-se o tubo da sonda com um fluido. Muitos pesquisadores têm preferido preencher a sonda com algum fluido. Além de poderem ajustar a capacidade térmica dela, de forma que $M \approx 1$, o uso de um fluido preenche os espaços vazios no interior da sonda, garantindo melhor estabilidade térmica da sonda e reduzindo o tempo de resposta.

Outra fonte de erro desconsiderada é a resistência de contato entre a superfície da sonda e a amostra; considerada suficientemente pequena, sendo desprezada na Equação (2.45). Porém, seus valores podem ser significativos, especialmente quando a sonda é inserida em regiões em que se formam espaços vazios entre ela e a amostra. Conforme se pode notar na Equação (2.48), qualquer aumento na resistência de contato causa um deslocamento da curva da temperatura em função do tempo, sem, no entanto, alterar sua inclinação. Assim, a precisão da sonda não é afetada. O efeito da resistência de contato

pode ser eliminado limitando-se a análise dos dados à parte linear da curva. (MURAKAMI et al., 1996).

Ainda, o efeito convectivo na transferência de calor pode estar presente no uso da sonda linear de aquecimento. A sonda foi baseada na transferência de calor por condução somente. A convecção aumenta a taxa de transferência de calor através da amostra. Murakami et al. (1996) conduziu experimentos com glicerina e água por 110s e $Q=11$ W/m. A convecção teve início aos 10 segundos na água, e próximo aos 70 segundos, na glicerina. A convecção além de modificar a inclinação da curva, diminui sua porção linear, podendo gerar resultados insatisfatórios, devido à insuficiência de dados para análise. Seus efeitos podem ser evitados com o uso de baixa potência na fonte de calor, redução da duração do teste e adição de materiais inibidores de convecção, como ágar ou lã de vidro. A potência empregada e a duração do teste apropriada são determinadas durante a calibração. Ágar deve ser adicionado às amostras líquidas, tornando-as gel. Sweat (1986), citado por Rao e Rizvi (1994), recomendam adicionar ágar à água. Murakami et al. (1994) cita a mistura de água e 0,6% ágar como um excelente material para calibração.

A calibração é usada para aumentar a precisão da sonda na determinação da condutividade térmica, corrigindo desvios devido aos fatores já mencionados. O fator de calibração é determinado experimentalmente através de testes realizados com os mesmos parâmetros de operação (potência da fonte de aquecimento, duração do teste, raio do recipiente contendo a amostra) que serão utilizados com a amostra. Em vez da amostra, usa-se um material de calibração de condutividade térmica conhecida. Teoricamente, as massas térmicas da amostra e do material de calibração deveriam ser iguais. No entanto, como essa relação é de difícil obtenção, o material de calibração deve ser escolhido de forma que a inclinação de sua curva T-t seja o mais próximo possível da inclinação dessa mesma curva para a amostra. (SWEAT, 1986, apud RAO; RIZVI, 1994; MURAKAMI et al., 1996). Os materiais de calibração mais utilizados para alimentos são água e glicerina. O valor da condutividade térmica da glicerina P.A., a 28°C, encontrado na literatura, é de 0,285W/mK, segundo PERRY (1997) e 0,286W/mK, segundo Incropera e Dewitt (1998).

A presença do efeito de borda é outra causa de erro na determinação da condutividade térmica. É causado pela transferência de calor nas fronteiras da amostra, aumentando ou diminuindo a condução através da amostra. A condutividade térmica do meio em que a amostra se encontra afeta o desenvolvimento do efeito de borda fazendo com que, ao final do teste, a curva de T em função de t apresente-se não linear. Experimentos conduzidos por Murakami et al. (1994), em diferentes meios, ilustram esse efeito. Resultados em meios cuja condutividade térmica é relativamente baixa mostram que a curva T-t move-se para cima assim que o efeito de borda se desenvolve. Esse resultado indica que, quando o calor alcança as fronteiras da amostra, a condução através dela

diminui. O meio com baixa condutividade atua como um isolante, diminuindo o gradiente de temperatura na amostra. Em meios com condutividade térmica relativamente alta, o resultado do efeito de borda faz com que a curva T-t curve-se para baixo. A alta taxa de calor transferido através das fronteiras aumenta a condução de calor na amostra, mantendo-se o gradiente de temperatura. Se o efeito de borda não for notado e somente a parte não-linear da curva for eliminada, em um meio cuja condutividade térmica é mais baixa que a da amostra, a condutividade térmica calculada para a amostra terá seu valor diminuído em relação àquela calculada desconsiderando-se o efeito de borda. Por sua vez, em meio com condutividade térmica mais alta que a da amostra, a condutividade térmica calculada para a amostra será maior. (MURAKAMI et al.,1994).

A existência do efeito de borda pode afetar parâmetros operacionais, tais como a duração do teste e a potência da fonte (Q).

Murakami et al. (1996) avaliaram o efeito da calor dissipado pela fonte linear e da duração do teste sobre o efeito de borda. A temperatura ao longo do raio da amostra pode ser obtida através da derivada parcial da Equação (2.44) em relação ao raio:

$$\frac{d(\Delta T)}{dr} = -\frac{1}{2\pi k} \frac{Q}{r} \quad (2.53)$$

Os autores realizaram testes com duração de 10 segundos, utilizando água, e mostraram que, aumentando a potência da fonte em 900%, a frente de aquecimento desloca-se de 31%. Em seguida, fixaram a potência em 5 W/m e testaram vários tempos de teste. Aumentando-se a duração do teste em 900%, a frente de calor desloca-se de 167%. Esses resultados sugerem que, comparativamente, a frente de calor é mais sensível ao tempo de duração do teste do que à potência da fonte de calor.

Para se evitar o efeito de borda, Vos (1955), citado por Murakami et al. (1996) e Elustondo, Elustondo e Urbicain (2001), recomendam que $\beta_{amostra}^2 > 1,7$, onde $\beta_{amostra}$ é calculado com a Equação (2.40), usando-se $r_{amostra}$, em vez da distância d . No entanto, essa equação não leva em conta a potência da fonte e requer o conhecimento da difusividade térmica da amostra para o cálculo. Elustondo, Elustondo e Urbicain (2001) recomendam estimar-se o raio da amostra, que possa ser considerado infinito, avaliando-se a quantidade de calor, $Q_{amostra}$, que atinge o raio da amostra após determinado tempo. Essa quantidade de calor é calculada através da equação da sonda ideal (Equação (2.53)), para $r = r_{amostra}$, e também requer o conhecimento da difusividade térmica da amostra:

$$Q_{amostra} = 2\pi r_{amostra} k \frac{\partial \Delta T}{\partial r} = Q e^{(\beta_{amostra}^2)} \quad (2.54)$$

O autor define então um fator adimensional que leva em conta a fração de calor suprida pela fonte que teoricamente atinge as paredes do recipiente contendo a amostra.

$$\eta = \frac{Q_{\text{amostra}}}{Q} = e^{(\beta_{\text{amostra}}^2)} \quad (2.55)$$

Essa equação pode ser utilizada para estimar o raio da amostra, verificando-se, depois, o efeito de borda através da curva de T-t. Uma vez que a teoria assume que a sonda é inserida em um meio infinito, o efeito do tamanho finito da amostra pode causar erros se a fronteira da amostra experimentar um aumento de temperatura durante a determinação da condutividade térmica. Para minimizar o erro proveniente dessa fonte, a duração do teste pode ser diminuída e o raio da amostra, aumentado. Experimentalmente, pode-se dispor de um termopar na fronteira da amostra que indique quando a temperatura começa a ser sentida nessa região, indicando aí o término do teste. (MOHSEIN,1978; ELUSTONDO; ELUSTONDO; URBICAIN, 2001).

Ainda, segundo Elustondo, Elustondo e Urbicain (2001), tanto tempos curtos quanto longos demais para a duração do teste são fontes significantes de erro. Esse método deve, então, ser aplicado em um período de tempo que fique entre tempo inicial mínimo, depois do qual o erro devido ao truncamento e ao raio finito são desprezíveis, e o tempo final máximo, depois do qual os erros devido ao comprimento finito da sonda e as dimensões da amostra começam a ser significantes.

Mohsenin (1978) destaca também que durante o projeto da sonda linear de aquecimento, deve ater-se à razão mínima entre o comprimento da sonda e seu diâmetro. Essa razão garante que o fluxo axial de calor seja desprezível frente ao fluxo radial; condição sob a qual a solução matemática da sonda foi baseada. BLACKWELL (1956), citado por esse autor, derivou a seguinte expressão para o limite máximo do erro relativo ao fluxo axial (ΔR_{Max}):

$$\Delta R_{\text{max}} = \frac{5,64}{a} + 6,8 \times 10^{-3} ba(c - d) \exp(-0,01a^2), \quad (2.56)$$

onde: **a** é a razão entre o comprimento da sonda e o diâmetro externo ($L_{\text{sonda}}/d_{\text{sonda}}$); **b** é quatro vezes a espessura da parede da sonda dividido pelo diâmetro externo ($4e_{\text{ps}}/d_{\text{sonda}}$); **c** é a razão entre a condutividade térmica da sonda e a condutividade térmica da amostra ($k_{\text{sonda}}/k_{\text{amostra}}$) e **d** é igual a razão entre a razão da condutividade e difusividade térmica da sonda ($k_{\text{sonda}}/\alpha_{\text{sonda}}$) e a razão da condutividade e difusividade térmica da amostra ($k_{\text{amostra}}/\alpha_{\text{amostra}}$).

Usando-se a relação acima, o autor mostrou que para uma sonda com diâmetro externo de 3,17 cm e 0,32 cm de espessura de parede, e razão entre comprimento e diâmetro externo igual a 25, o máximo erro calculado foi menor que 1%. Sweat (1986), citado por Rao e Rizvi (1994), recomenda que essa razão seja maior que 25, enquanto, Hooper e Lepper (1950), citados por Mohsenin (1978), recomendam razões maiores que 100 para se eliminar o erro devido ao fluxo de calor axial.

Tipicamente, a sonda utilizada consiste em um tubo metálico fino, contendo no seu interior uma resistência elétrica e um termopar, isolados um do outro e do próprio tubo. O termopar é localizado na metade do comprimento da sonda. Murakami et al. (1996), utilizaram uma sonda confeccionada com uma agulha hipodérmica de 0,66mm de diâmetro. Nela foi introduzido uma resistência elétrica de constantan, de 0,077mm de diâmetro, e um termopar tipo E (chromel-constantan) de 0,051mm de diâmetro, ambos isolados por tubos plásticos. Devido às dificuldades encontradas para construir uma sonda com a resistência e o termopar juntos na mesma agulha, nas dimensões citadas por esse e outros autores (HOOPER e LEPPER, 1950; D'EUSTACIO et al., 1952; SWEAT e HAUGH, 1974, citados por, MURAKAMI et al., 1996), alguns autores têm preferido construí-la com o termopar do lado externo da agulha hipodérmica, preenchendo o espaço entre eles com a própria amostra (QUEIROZ, 2001). Testes comparativos utilizando-se esse tipo de sonda e sondas com o termopar no interior da agulha e fixado na parte externa da agulha foram conduzidos por Sweat (1986), citado por Rao e Rizvi (1994). Aquelas proporcionaram valores mais precisos de condutividade térmica, enquanto com estas, os resultados foram consistentes e com precisão aceitável, quando um fator de calibração foi usado.

Dessa forma, uma avaliação dos parâmetros relacionados à construção da sonda linear de aquecimento, ao tamanho da amostra e daqueles envolvidos na execução do experimento deve ser feita, minimizando, assim, os erros associados ao uso deste método para a determinação da condutividade térmica.

2.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

As etapas para a realização deste estudo, apresentadas no capítulo seguinte, serão precedidas, em sua maioria, de planejamentos experimentais e em seguida, os dados obtidos, submetidos a análises estatísticas que auxiliarão nas conclusões e tomadas de decisões. Assim, no decorrer deste trabalho utilizar-se-ão inúmeros conceitos da área de estatística, motivo pelo qual, será apresentado no Apêndice A uma revisão bibliográfica englobando estes conceitos.

CAPÍTULO III

MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo foi dividido em três etapas principais: determinação das condições de cocção da pizza, quantificação dos mecanismos de transferência de calor envolvidos durante a cocção da pizza e determinação das propriedades termofísicas da pizza. A Figura 3.1 apresenta um organograma dos procedimentos adotados, que serão descritos a seguir.

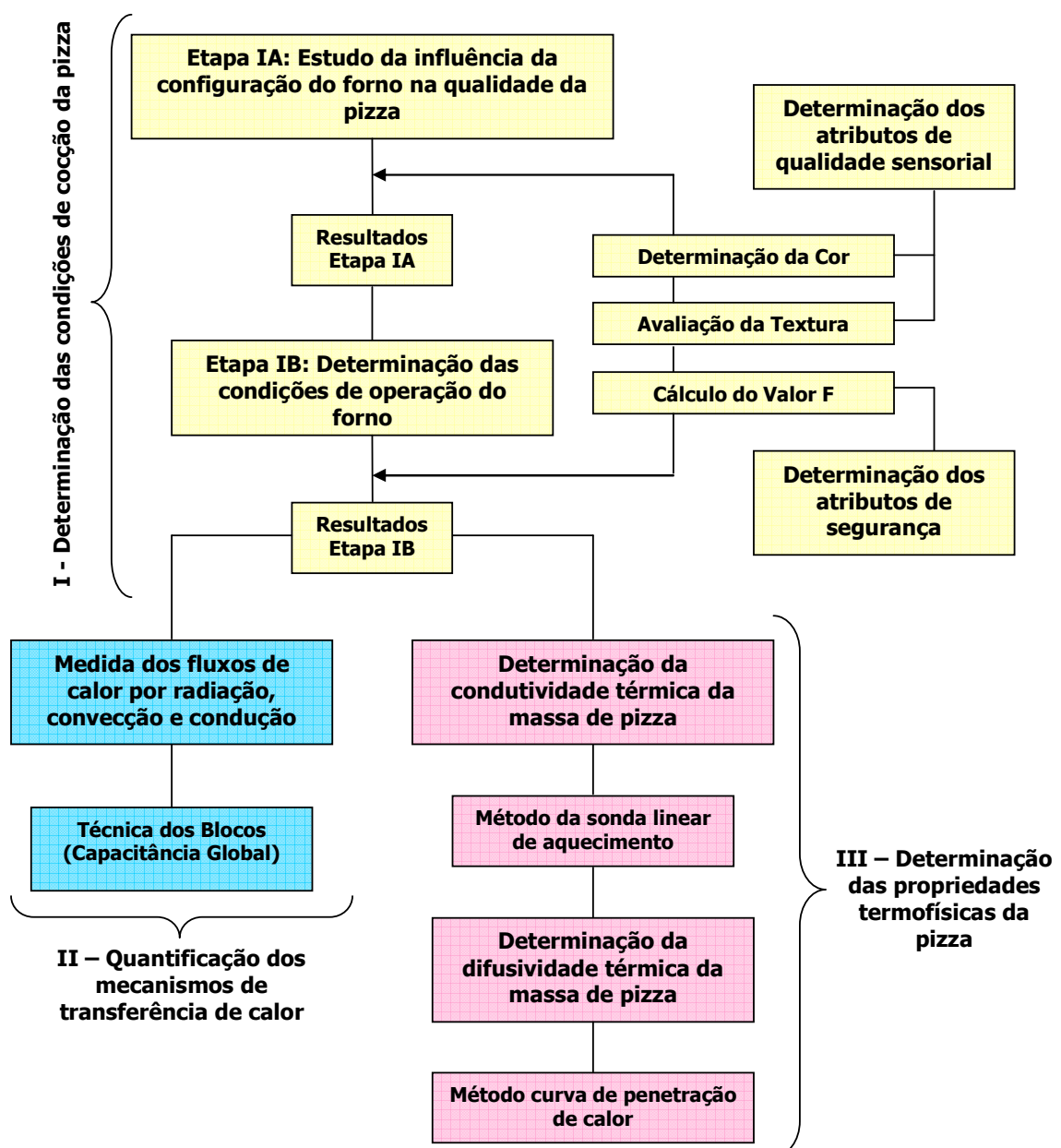


Figura 3.1 – Esquema das etapas realizadas para a determinação das condições de cocção da pizza, da quantificação dos mecanismos de transferência de calor e das propriedades termofísicas da pizza.

Serão introduzidas primeiramente as informações referentes à construção do protótipo de um forno, do sistema de aquisição de temperaturas, seguido das metodologias para avaliação da qualidade da pizza, para a determinação das condições de cocção da pizza, das condições térmicas do forno e das propriedades termofísicas da pizza.

Por *determinação das condições de cocção da pizza* entende-se a escolha da configuração e das condições de operação do forno que forneçam as melhores respostas em termos de qualidade da pizza. Difere-se da etapa de *quantificação dos mecanismos de transferência de calor*, nesta são determinados os mecanismos de transferência de calor (radiação, condução e convecção) predominantes durante o processo de cocção.

Como já foi mencionado anteriormente, os termos configuração e condições de operação do forno são utilizados, neste trabalho, com sentidos diversos: configuração do forno refere-se à forma como radiação, convecção forçada e material da base em contato com a pizza são combinados durante a cocção da pizza e condição de operação do forno refere-se à combinação das diferentes níveis de temperatura, freqüência do ventilador e tempo de cocção testados.

3.1 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO FORNO

A construção de um protótipo do forno de cocção teve por objetivos estudar o processo de cocção da pizza e possibilitar a determinação dos mecanismos de transferência de calor predominantes na cocção. Através da cocção de pizzas neste protótipo, é possível verificar as melhores condições para se obter um produto de qualidade. O protótipo construído no LABTUCAL/UFSC consiste em uma câmara retangular com 50 cm de comprimento, 50 cm de largura e 25 cm de altura, construída com chapas de latão, com espessura de parede de 1,2 mm. A capacidade deste protótipo é de uma pizza de aproximadamente 30 cm de diâmetro.

Desenvolver um protótipo de forno com termossifões com as dimensões especificadas tornar-se-ia construtivamente inviável e sua execução demasiadamente trabalhosa, tendo em vista que a aplicabilidade desta tecnologia depende do ajuste de diversos fatores como: dimensão dos tubos, ângulo de inclinação, razão de enchimento etc. Desta forma, optou-se por construir o protótipo utilizando resistências elétricas, localizadas entre duas chapas e fixadas nas superfícies laterais, na superfície superior (teto) e na superfície inferior (base), de forma a simular um forno com termossifões. As resistências funcionam independentemente umas das outras (Figura 3.2), permitindo assim um melhor ajuste da temperatura de cada superfície. Dessa forma, pode-se avaliar o efeito e a necessidade do uso de termossifões nas laterais e/ou no teto sobre a qualidade da pizza.

Usualmente a cocção de pizzas é feita em fornos de lastro, apoiadas sobre pedras refratárias ou em fornos elétricos convencionais, sobre formas de alumínio. Um grupo de pesquisa da Universidade de Campinas estudou formas de materiais alternativos ao alumínio e concluíram que pizzas assadas em formas de ferro fundido apresentam-se mais crocantes e saborosas que aquelas assadas em forma de alumínio, além de relatar um menor tempo para a cocção da pizza. (JORNAL DA UNICAMP, 2004). Para este estudo, dois tipos de forma serão testados: de alumínio e de pedra. Essas formas simularão a superfície inferior de um forno com base de alumínio e de um forno de lastro, com base de pedra, onde as pizzas são diretamente assadas (Figura 3.3).

O ventilador, responsável pela convecção forçada dentro do forno, está posicionado na parte central superior do forno e tem frequência variável (Figura 3.4). Imagens de detalhes do forno especialmente construído para este estudo podem ser observadas abaixo.

O forno foi recoberto com uma camada de aproximadamente 10 cm de lã de vidro, isolando-o termicamente (Figura 3.5).

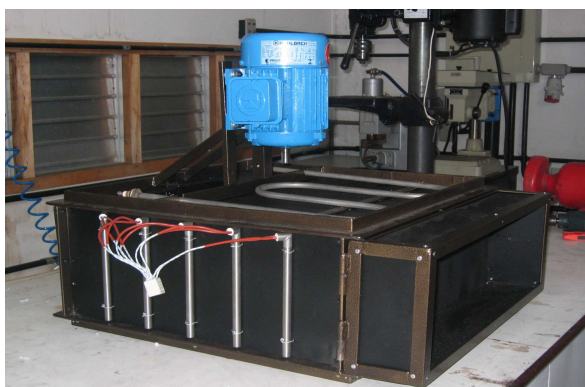


Figura 3.2 – Vista das resistências fixadas no forno.



Figura 3.3 – Forma de pedra utilizada na cocção.

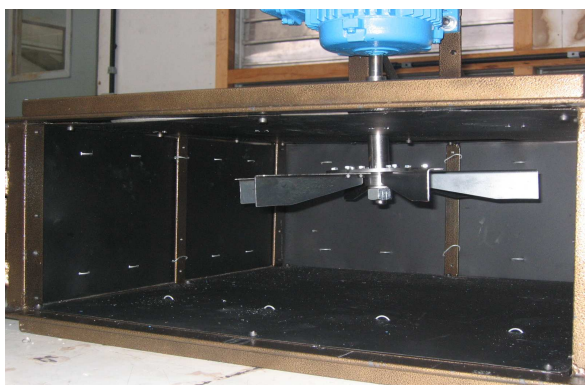


Figura 3.4 – Vista do ventilador acoplado ao forno.



Figura 3.5 – Isolamento térmico do forno.

3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURAS

Todos os dados de temperatura foram adquiridos em intervalos regulares de tempo, através do sistema de aquisição de dados *HP Benchlink Data Logger 34970A* (Agilent®). Este sistema foi conectado a 49 termopares, 22 localizados nas superfícies dentro da câmara de cocção, conforme ilustra a Figura B.1, Apêndice B, 22 localizados junto às resistências e 5 localizados no ar, dentro da câmara. Os sensores de temperatura utilizados para a aquisição das temperaturas do forno e demais temperaturas necessárias nesse estudo foram termopares tipo K (cromel/alumel; Ohmega®).

Para a aquisição de temperatura no bloco, foi utilizada uma caixa isotérmica. O funcionamento de um termopar simples envolve sempre uma junta de medição e uma junta de referência. Em uma caixa isotérmica, um bloco de cobre é utilizado para homogeneizar a temperatura do conjunto de juntas de referência dos termopares. O bloco de cobre e o conjunto de juntas de referência nele inseridas estão isolados do ambiente por uma camada de poliuretano expandido, garantindo assim que todas as juntas de referência estejam à mesma temperatura. A junta de referência, mantida na mesma temperatura para todos os termopares permite uma maior precisão nas medidas do potencial elétrico gerado por cada termopar, pois a contribuição no potencial elétrico relativo à temperatura da junta de referência é a mesma para todos os termopares. Assim, conhecendo-se a temperatura de um termopar é possível eliminar o erro sistemático cometido para a leitura de todos os outros termopares. Para isso, dois termopares são inseridos em uma garrafa “isotérmica” contendo gelo de água destilada triturado, adotando-se assim como temperatura de referência 0°C.

O conjunto de termopares foi calibrado com um forno de calibração de termopares especialmente para este fim, obtendo uma curva que correlaciona a tensão medida com a temperatura e a incerteza associada ao sistema. O diferencial de tensão medido por cada um dos termopares é convertido com o uso de um computador pessoal e do software *HP Benchlink Data Logger*, onde a curva de calibração é introduzida para a leitura das temperaturas no momento da medição. Cada leitura de tensão é realizada com um tempo de integração de 0,12 s. A incerteza expandida para uma confiabilidade de 95% é de 0,2°C, para diferenças de temperaturas, e de 0,8°C para medição das temperaturas absolutas. A Figura 3.6 apresenta um esquema do funcionamento de uma caixa isotérmica.

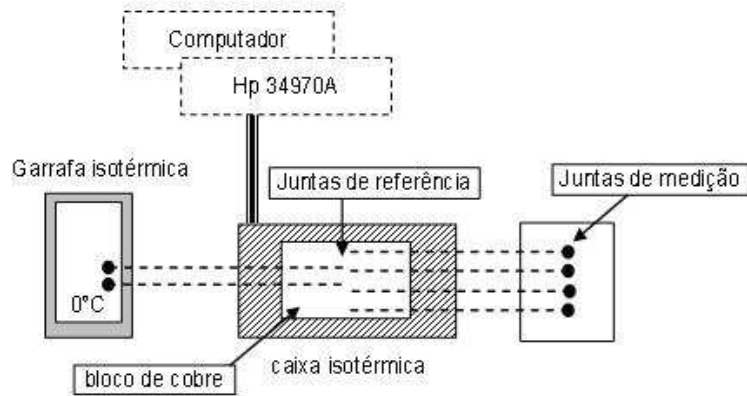


Figura 3.6 – Ilustração esquemática do funcionamento de uma caixa isotérmica.

3.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA PIZZA

A qualidade da pizza foi avaliada segundo os requisitos de segurança microbiológica e de qualidade sensorial. A metodologia para a avaliação desses requisitos é descrita a seguir.

3.3.1 Requisito de segurança microbiológica

Conforme apresentado no Capítulo II, a segurança do alimento, do ponto de vista microbiológico, pode ser avaliada através do valor F_{processo} e do número de reduções decimais, γ , para o microrganismo alvo.

A letalidade referência do processo de cocção de pizza, o valor $F_{T_{\text{ref}}}$, foi obtida pela Equação (2.1), com base em 4 reduções decimais em relação ao microorganismo patogênico de maior resistência térmica, ou seja, o *Bacillus cereus*, cujo valor D é igual a 3,7min. (222 s) à temperatura de referência de 90°C .

A letalidade integral para cada configuração e condição de operação do forno, o valor F_{processo} , foi obtida através da Equação (2.3), cuja integração numérica foi realizada através da regra de Simpson Composta, dada pela Equação (3.1) e o número de reduções decimais, através da Equação (2.4):

$$F_{\text{processo}} = \int_{t_0}^{t_f} L(t) dt \approx \frac{2\Delta t}{3} (L_0 + 4L_1 + 2L_2 + \dots + 2L_{n-2} + 4L_{n-1} + L_n) \quad (3.1)$$

onde $L(t)$ é o índice letal, calculado à temperatura de referência, dado pela Equação (2.2). O número de reduções decimais foi obtido pela Equação (2.4). A temperatura em função do tempo, $T_{\text{pizza}}(t)$, foi obtida inserindo-se um termopar próximo ao centro geométrico da pizza.

3.3.2 Requisitos de qualidade sensorial

Os atributos de qualidade sensorial escolhidos para representar a qualidade da pizza foram: cor da pizza, textura da crosta e elasticidade da massa. A importância de cada um desses atributos foi previamente definida, pelo Teste de Ordenação, através de uma pesquisa realizada entre 100 pessoas. Os entrevistados, selecionados entre frequentadores de pizzarias da cidade de Florianópolis e entre professores e estudantes da UFSC, com idade entre 20 e 60 anos, foram solicitados a enumerar esses atributos, em ordem de importância, segundo sua avaliação. Com base nos resultados, foram definidos os graus de importância para os atributos de qualidade estudados, auxiliando a tomada de decisão com relação à escolha da melhor configuração e condições de operação do forno.

Ainda, foi avaliada a perda de água durante o processo de cocção, associando-a aos demais atributos de qualidade. Todas as pizzas analisadas, de um único sabor (muçarela) e congeladas, foram obtidas de um mesmo lote de produção.

3.3.2.1 Avaliação da cor

A cor das pizzas foi avaliada pela comparação entre as imagens das pizzas assadas sob as condições de cocção determinadas e uma escala padrão de cor, desenvolvida especialmente para este fim.

3.3.2.1.1 Construção da escala padrão de cor: limites de aceitação e rejeição

Para a construção da escala padrão de cor, pizzas foram assadas em diferentes tempos: 0 (crua), 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 e 36 minutos, em forno elétrico, modelo Fischer, a 200°C e, em seguida, fotografadas e codificadas.

Os limites de aceitação e rejeição para a cor da pizza foram definidos através de análise sensorial, por teste de aceitação. Para este teste, foi utilizado o teste de escala Hedônica de 5 pontos, cuja escala varia de “1 - desgostei muito” a “gostei muito”.

Uma ficha de avaliação sensorial para a realização dos testes foi desenvolvida (Figura 3.7) e, juntamente com as imagens das pizzas, enviada aos julgadores via correio eletrônico. No total, sessenta e oito julgadores não-treinados, com idade entre 20 e 45 anos, recrutados entre alunos e professores universitários, realizaram os testes. Os julgadores foram solicitados a avaliar a cor das pizzas conforme a escala apresentada na ficha de avaliação.

FICHA DE AVALIAÇÃO SENSORIAL										
TESTE DE ACEITAÇÃO - ESCALA HEDÔNICA										
Atributo avaliado: COR										
Nome:	Idade:	Data:								
Instruções: Você está recebendo um arquivo onde consta uma série de imagens codificadas de pizzas. Observe-as cuidadosamente e avalie a COR de cada uma delas separadamente. Represente o quanto você gostou ou desgostou da COR de cada pizza, de acordo com a seguinte escala:										
<ul style="list-style-type: none"> (1) Desgostei muito (2) Desgostei (3) Indiferente (4) Gostei (5) Gostei muito 										
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Código da Amostra</th> <th style="width: 50%;">Valor Atribuído</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>		Código da Amostra	Valor Atribuído							
Código da Amostra	Valor Atribuído									
Comentários: _____										

Figura 3.7 – Ficha modelo para avaliação sensorial da cor pelo Teste de Aceitação, utilizando-se Escala Hedônica de 5 pontos.

O tratamento estatístico dos dados para o teste de aceitação utilizando-se escala hedônica foi feito por análise de variância e a comparação das médias, pelo teste de Tukey, com nível de significância de 5%. A aceitação foi avaliada através de histogramas de frequência dos valores hedônicos e pelo índice de aceitação, IA, de cada amostra.

$$\text{Índice de Aceitação} = IA = \frac{100N_{\text{avaliação}}}{5} \quad (3.2)$$

onde, $N_{\text{avaliação}}$ é a média das notas do Teste de Aceitação, para uma determinada amostra.

Segundo Teixeira, Meinert e Barbetta (1987), para uma amostra ser aceita, o Índice de Aceitação, calculado pela Equação (3.2), deve ser igual ou superior a 70%.

A Figura 3.8 apresenta um fluxograma desta etapa, para melhor compreensão.

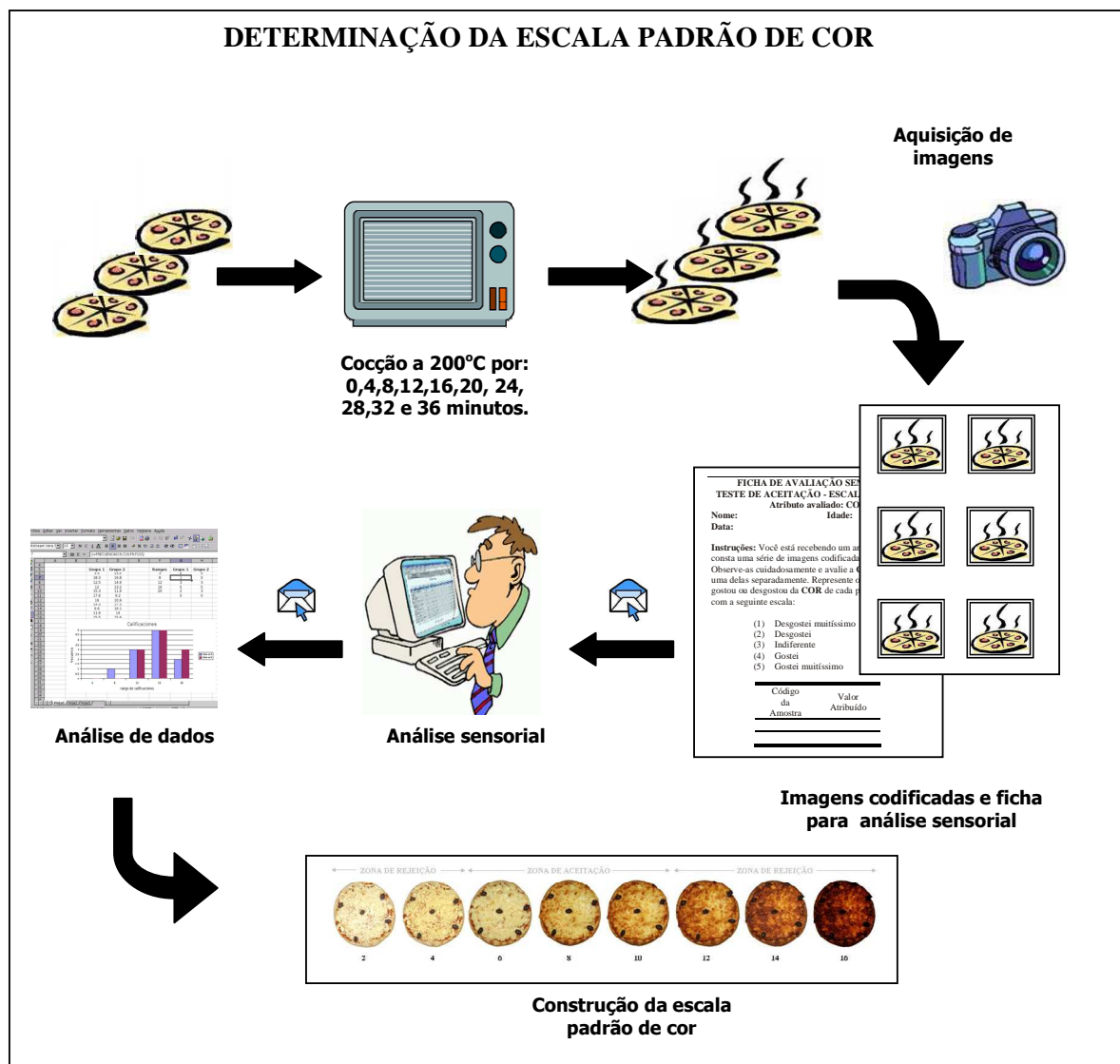


Figura 3.8 – Esquema da determinação da escala padrão de cor

3.3.2.1.2 Obtenção de imagens

Uma câmera digital, modelo Canon EOS Digital Rebel, foi utilizada para a obtenção de imagens da pizza sob condições de iluminação padronizada. Como fontes de iluminação, foram utilizadas duas lâmpadas de 6500 K, indicadas para minimizar as variações da luz do dia. Essas lâmpadas, medindo 45 cm cada uma, foram fixadas a uma altura de 40 cm da base e distantes 50 cm entre si. O ângulo formado entre o eixo da lente da câmera e cada uma das fontes de iluminação foi de aproximadamente 45°. A distância entre a lente da câmera e a pizza foi de 60 cm. A Figura 3.9 ilustra este sistema de obtenção das imagens, juntamente com a bancada experimental. As imagens da superfície da pizza foram obtidas sob as seguintes condições de operação da câmera: representação de cores sRGB, comprimento focal de 28mm, abertura do diafragma de F/5,6, tempo de exposição 1/200 segundos, método padrão de medição, utilização de flash.



Figura 3.9 – Sistema de obtenção das imagens.

3.3.2.1.3 Determinação da cor

As demais pizzas foram assadas, em duplicata, com base nos planejamentos dos testes da Etapa I, nas diferentes configurações e/ou condições de operação do protótipo. Em seguida, foram fotografadas sob condições padronizadas, descritas anteriormente, e devidamente codificadas. Juntamente com a escala padrão de cor construída, cada imagem da pizza obtida foi enviada, por correio eletrônico, para 10 julgadores previamente selecionados. Os julgadores foram então solicitados a comparar cada imagem codificada com a escala padrão de cor e avaliar em que intervalo desta escala esta se encontrava, atribuindo-lhe uma nota. A avaliação de cada imagem foi feita através da média das notas atribuídas por cada julgador, situando-a na zona de rejeição ou aceitação da escala padrão de cor.

3.3.2.2 Avaliação da textura da borda

Com base nos planejamentos dos testes da Etapa I, as pizzas foram assadas, em duplicata e, em seguida, a borda da pizza foi cortada e dividida em amostras de aproximadamente 1 cm^2 . As amostras foram apresentadas aos julgadores em pequenos copos plásticos fechados com papel alumínio e estes, devidamente codificados.

A textura da borda foi avaliada em termos de sua dureza. Para este estudo, a dureza foi definida como a força necessária para comprimir a amostra entre os dentes molares na primeira mordida, ocasionando uma deformação.

A textura da borda de cada uma das pizzas foi avaliada por 25 julgadores através de análise sensorial, utilizando-se a escala-do-ideal (*just right scale*) com cinco categorias: 1 – muito inferior ao ideal (muito macia), 2 – inferior ao ideal (macia), 3 – ideal, 4 – superior ao ideal (dura), 5 – muito superior ao ideal (muito dura), conforme apresentada na Figura 3.10.

A análise dos dados da escala-do-ideal foi feita avaliando-se a média dos valores encontrados e a frequência das respostas “ideal”, estabelecendo-se um valor mínimo de 50% de respostas para essa categoria, para que a pizza fosse considerada aceita pelos consumidores.

Tanto a escala de aceitação de cor quanto a avaliação da textura da borda foram realizadas conforme as normas NBR12806 (Análise sensorial de alimentos e bebidas – Terminologia), NBR12994 (Métodos de análise sensorial de alimentos – Classificação) e NBR14141 (Escala utilizadas em análise sensorial de alimentos e bebidas), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

FICHA DE AVALIAÇÃO SENSORIAL							
TESTE DE ACEITAÇÃO – ESCALA-DO-IDEAL							
Atributo avaliado: TEXTURA DA BORDA							
Nome:	Idade:	Data:					
<p>Você está recebendo uma série de amostras codificadas. Prove-as cuidadosamente e avalie cada uma delas utilizando a escala abaixo. Represente com um X a posição que melhor reflita seu julgamento em relação à TEXTURA DA BORDA de cada amostra.</p>							
TEXTURA DA BORDA							
AMOSTRA N°							
5 - Muito superior ao ideal (muito dura)							
4 - Superior ao ideal (dura)							
3 - Ideal							
2 - Inferior ao ideal (macia)							
1 - Muito inferior ao ideal (muito macia)							
Comentários: _____							

Figura 3.10 – Ficha modelo para avaliação sensorial da textura da crosta pelo Teste de Aceitação, utilizando-se Escala-do-Ideal de 5 pontos.

3.3.2.3 Avaliação de perda de água durante a cocção

A perda de água durante o processo de cocção foi avaliada pela diferença de massa entre a pizza crua e imediatamente após a cocção, utilizando-se uma balança analítica. Considera-se que a diferença de peso entre a pizza crua e assada deve-se apenas à perda de água, sendo os demais componentes voláteis desconsiderados.

A Figura 3.11 sintetiza a avaliação da qualidade da pizza, descrita anteriormente.

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA PIZZA

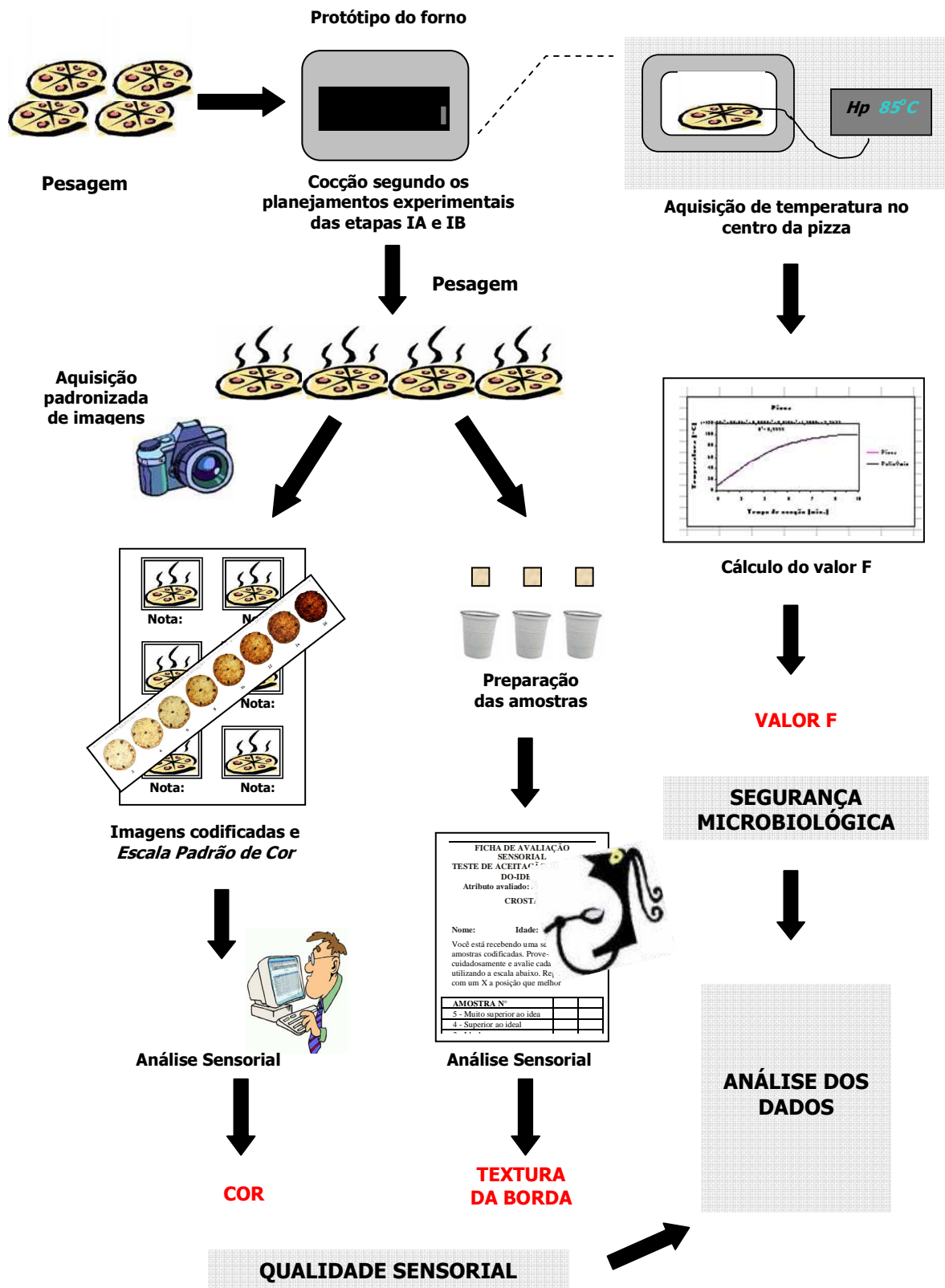


Figura 3.11 – Avaliação da qualidade da pizza.

3.4 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE COCÇÃO DA PIZZA

A etapa de determinação das condições de cocção da pizza foi subdividida em duas outras etapas: estudo da influência da configuração do forno na qualidade da pizza, incluindo a escolha da melhor configuração para sua cocção (etapa IA) e determinação das condições de operação do forno (etapa IB). As diferentes *configurações do forno* são dadas pelas diferentes combinações entre troca de calor por radiação entre as paredes laterais do forno e a pizza, troca de calor por radiação entre a superfície superior do forno e a pizza, presença ou não de convecção forçada, tipo de material da superfície inferior em contato com a pizza. Por sua vez, as diferentes *condições de operação do forno* são dadas pelas combinações entre os seguintes fatores ajustáveis do forno: temperatura, tempo e frequência do ventilador. A execução de ambas as etapas foi orientada através dos planejamentos experimentais e a qualidade, avaliada pelos requisitos de qualidade.

3.4.1 Etapa IA – Estudo sobre a influência da configuração do forno na qualidade da pizza

O objetivo desta etapa foi obter informações sobre a influência da configuração do forno na qualidade da pizza e selecionar a configuração que fornece uma pizza dentro dos limites de aceitação de qualidade.

Para a realização desta etapa, o tempo de cocção e a temperatura foram fixados em 250°C e 10 minutos, respectivamente. Os fatores estudados foram: (A) contribuição da radiação pela superfície superior do forno, (B) contribuição da radiação pelas paredes laterais do forno, (C) convecção forçada e (D) material da superfície inferior em contato direto com a pizza. Os níveis desses fatores são apresentados na Tabela 3.1. A combinação dos diferentes níveis de cada um desses fatores caracterizou diferentes configurações do forno. Os efeitos principais e de interação entre esses fatores foram avaliados com relação à qualidade da pizza (resposta), em termos dos fatores de qualidade sensorial e de segurança (Valor F_{processo} e γ). A Figura 3.12 apresenta um esquema da realização dessa etapa.

Tabela 3.1 – Fatores estudados na 1ª Etapa e seus níveis

<i>Fatores (k)</i>	<i>Níveis dos Fatores</i>	
	<i>(-1)</i>	<i>(+1)</i>
A: Radiação pelo teto	Não	Sim
B: Radiação pelas paredes	Não	Sim
C: Convecção forçada	Não	Sim
D: Material da forma	Alumínio	Pedra

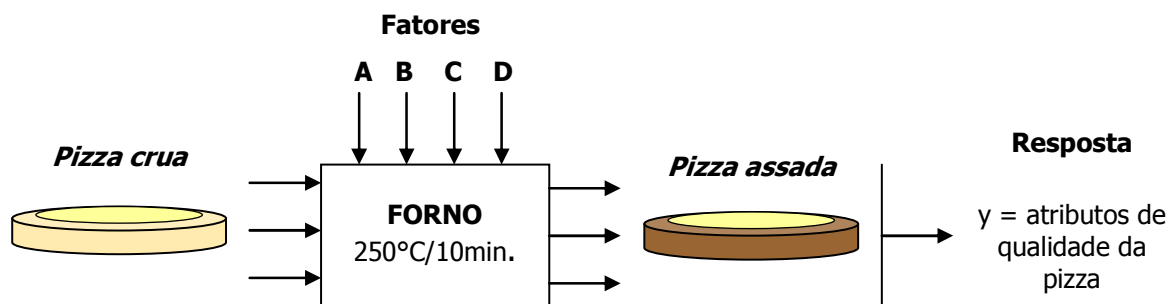


Figura 3.12 – Esquema do estudo sobre a influência da configuração do forno na qualidade da pizza

O bloqueio da radiação, correspondente ao nível (-1) dos fatores A e B, foi feito através do recobrimento das paredes do forno com papel alumínio. A convecção forçada foi induzida através de um ventilador acoplado ao teto do forno, operando a uma frequência de 35 Hz. A porta do forno foi mantida coberta com papel alumínio durante todos os testes.

O planejamento fatorial completo dessa etapa e a análise estatística dos resultados obtidos para os fatores de qualidade são apresentados no Capítulo IV.

A partir das conclusões sobre o efeito desses fatores e de suas interações na qualidade da pizza, foi escolhida a melhor configuração para a cocção da pizza.

3.4.2 Etapa IB – Determinação das condições de operação do forno

O objetivo desta etapa é determinar as condições de operação do forno, a partir das conclusões obtidas na etapa anterior. Essas condições foram determinadas com relação aos seguintes fatores: temperatura das superfícies do forno (T), tempo de cocção (t) e frequência do ventilador (F_v), na configuração escolhida. Esse último fator foi estudado somente no caso de a convecção forçada, estudada na Etapa IA, ter tido influência significativa sobre a qualidade da pizza. Para cada um desses três fatores, foram estudados três níveis, apresentados na Tabela 3.2. Os testes foram iniciados com a combinação dos níveis mais baixos dos fatores. A qualidade da pizza foi avaliada segundo os atributos de qualidade sensorial e de segurança para cada teste. A Figura 3.13 apresenta um esquema da realização dessa etapa.

Tabela 3.2 – Fatores estudados na 2ª Etapa e seus níveis

<i>Fatores (k)</i>	<i>Níveis dos Fatores</i>		
	(1)	(2)	(3)
T: Temperatura das paredes (°C)	150	250	350
t: tempo (min.)	3	5	10
F _v : Frequencia do ventilador (Hz)	5	20	35

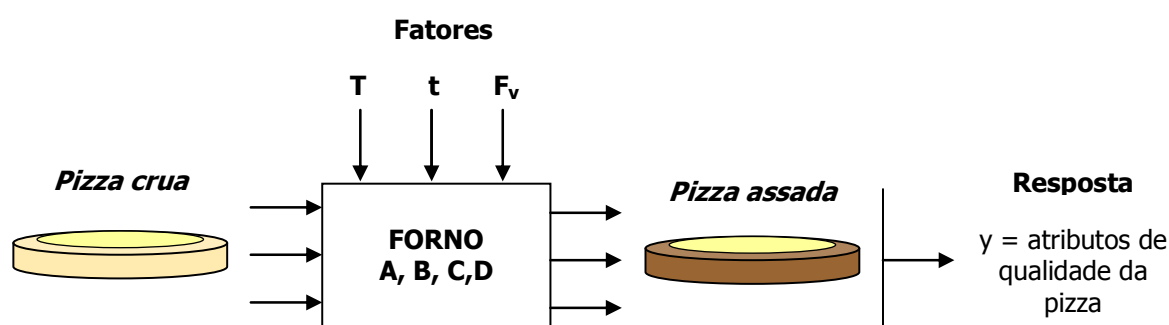


Figura 3.13 – Esquema do estudo das condições de operação do forno em relação à qualidade da pizza.

Os resultados obtidos nessa etapa são apresentados no Capítulo IV. Com base na análise desses dados, foram, então, determinadas as condições de cocção da pizza.

A partir dos resultados de ambas as etapas, pode-se determinar as condições de cocção da pizza e, então, determinar as condições térmicas do forno sob estas condições.

3.5 QUANTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

As caracterização térmica do forno foi feita em relação às parcelas de calor fornecidas à pizza pelos diferentes mecanismos de transferência de calor: radiação, convecção e condução; todos presentes durante a cocção. O objetivo desta etapa foi verificar quais desses mecanismos estão efetivamente contribuindo para a cocção da pizza, a fim de se projetar um forno utilizando tecnologias mais eficientes e que atenda a essas condições, preservando a qualidade do produto.

A técnica aplicada para a determinação das parcelas de transferência de calor radiativa, condutiva e convectiva é semelhante aquele desenvolvido por Milanez e Mantelli (2006) para fornos de cocção.

Uma cavidade é representada por um conjunto de superfícies que formam um volume no espaço fechado, onde todas as superfícies que compõem essa cavidade e outras superfícies localizadas em seu interior trocam calor entre si. Fornos de cocção podem ser, na maioria dos casos, tratados como cavidades. No caso específico de estudos envolvendo o desenvolvimento de fornos de cocção de alimentos, é necessário conhecer os mecanismos de troca de calor entre o forno e o alimento que está sendo assado para que o forno seja projetado de forma mais eficiente. Maior taxa de troca de calor por radiação pode ser conseguida se as paredes dos fornos forem mantidas em altos níveis de temperatura, enquanto que maior convecção pode ser conseguida aumentando-se a ventilação interna nestes fornos.

A parcela de calor transferida ao alimento por convecção pode ser determinada medindo-se a velocidade do ar no forno e utilizando correlações disponíveis na literatura. No entanto, uma modelagem matemática precisa, específica para cavidades do tipo de um forno, não é facilmente desenvolvida ou encontrada na literatura. A determinação das taxas de transferência de calor através do uso de correlações encontradas na literatura pode ser bastante imprecisa, já que são desenvolvidas para casos bastante específicos, muitas vezes diferentes das condições reais de funcionamento do forno em questão.

A parcela de calor por radiação, por sua vez, pode ser obtida a partir da medida das temperaturas de todas as superfícies envolvidas e da aplicação dos modelos disponíveis na literatura para a transferência de calor por radiação entre superfícies de uma cavidade e um objeto no seu interior. Estes modelos, embora precisos, são muito complexos e exigem implementação numérica sofisticada, sendo que modificações em qualquer um dos parâmetros envolvidos representam mudanças nas trocas de calor em toda a cavidade, exigindo novos cálculos.

Os dois métodos citados acima são métodos diretos, onde, a partir do conhecimento dos níveis de temperaturas e das potências elétricas transferidas às superfícies da cavidade, é possível estimar as taxas de troca de calor.

Muitas vezes, quando se pretende quantificar as taxas de calor que atingem o alimento pelos diferentes mecanismos de transferência de calor, a técnica dos blocos pode ser bastante conveniente. Neste caso mede-se diretamente a quantidade de calor que atinge o alimento e não a quantidade de calor que deixa todas as superfícies do forno. A técnica dos blocos foi empregada com sucesso na literatura (MILANEZ; MANTELLI, 2006) para avaliar o comportamento térmico de um forno de cocção doméstico, através da determinação de coeficientes de troca térmica por convecção e radiação.

3.5.1 Aplicação da técnica dos blocos para cavidades radiativas

A técnica dos blocos é bastante simples e se baseia no método da *capacitância global*. Considera-se um bloco qualquer, inicialmente a uma temperatura uniforme $T_{\text{bloco},i}$, colocado no interior de uma cavidade mais quente, $T_{\text{ar}} > T_{\text{bloco},i}$, conforme mostra a Figura 3.14. Para este estudo será utilizado um bloco de alumínio com grau de pureza de 99,5%, com $31 \pm 0,05$ cm de diâmetro e $1,3 \pm 0,05$ cm de altura; dimensões aproximadas às da pizza.

Para este estudo será assumida a hipótese ideal de que toda a cavidade se encontra perfeitamente isolada externamente, sendo todo calor dissipado pelas resistências elétricas transferido ao interior da cavidade, aquecendo suas superfícies internas. Assim, todas as trocas térmicas ocorrerão entre as superfícies internas da cavidade, o bloco (quando colocado no interior do forno) e o ar. O aquecimento do ar se dá por convecção das superfícies. Desta forma, assumir-se-á, que as temperaturas do ar serão funções das temperaturas de todas as superfícies aquecidas da cavidade.

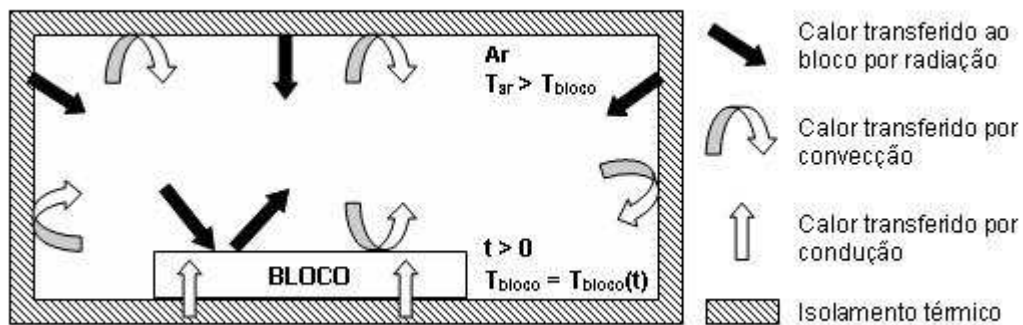


Figura 3.14 – Mecanismos de transferência de calor envolvidos no aquecimento do bloco.

Em $t > 0$, o bloco será, então, aquecido pela ação da radiação térmica (q_{rad} , através de trocas de calor com todas as superfícies da cavidade), da convecção (q_{conv} , com o ar quente que o circunda) e da condução (q_{cond} , através da superfície inferior da cavidade em contato com o bloco) até sua temperatura atingir o valor de T_{ar} . *A essência do método da capacitância global é a hipótese de que a temperatura no sólido é espacialmente uniforme em qualquer instante do processo transiente.* (INCROPERA; DEWITT, 1998). Admite-se, por essa hipótese, que os gradientes de temperatura são desprezíveis no interior do sólido. Se isso realmente acontecer, a variação da temperatura transiente será determinada por um balanço de energia global no bloco. Tomando o bloco da Figura 3.14 como volume de controle, um balanço de energia mostra que o acúmulo de energia interna, \dot{E}_{ac} , no regime transiente pode ser escrito da seguinte forma, com base nas taxas de troca térmica:

$$\dot{E}_{ac} \equiv \frac{dE_{ac}}{dt} = \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sai} \quad (3.3)$$

onde \dot{E}_{entra} representa a entrada de energia no volume de controle, \dot{E}_{sai} representa a saída de energia. Assim, assumindo-se que variação da energia interna do bloco deve-se somente à sua variação de temperatura, a Equação (3.3) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$q_{bloco} = mc_p \frac{dT_{bloco}}{dt} = q_{rad} + q_{conv} + q_{cond} \quad (3.4)$$

onde m é a massa do bloco, c_p é o calor específico à pressão constante do material do bloco, T_{bloco} é a temperatura do bloco e t é o tempo, q_{rad} é a taxa líquida de calor trocada por radiação entre as superfícies do forno e o bloco e, q_{conv} e q_{cond} são as taxas de calor que entram no volume de controle por convecção e por condução, respectivamente.

Considerando-se o ar como um meio não participante, a transferência radiativa líquida da superfície do bloco pode ser expressa em função radiossidade total e da irradiância total da superfície, conforme a equação:

$$q_{rad} = A_{bloco} (G_{bloco} - J_{bloco}) \quad (3.5)$$

onde A_{bloco} é a área da superfície do bloco e G_{bloco} e J_{bloco} são, respectivamente, a irradiância total e a radiossidade total da superfície do bloco. A irradiância total é a taxa de incidência de energia por radiação sobre a superfície do bloco, proveniente de todas as direções, por unidade de área superficial. A radiossidade total é a taxa de energia por radiação que deixa a superfície do bloco em virtude da emissão e da reflexão, em todas as direções, por unidade de área da superfície: (INCROPERA e DEWITT, 1998)

A radiossidade total do bloco, J_{bloco} , é, então, definida como:

$$J_{bloco} \equiv E_{bloco} + \rho_{bloco} G_{bloco} \quad (3.6)$$

onde E_{bloco} é a emitância total da superfície do bloco e ρ_{bloco} é a refletividade total da superfície do bloco. A emitância total é definida como taxa de energia por radiação emitida pela superfície do bloco em todas as direções, por unidade de área superficial. A refletividade total é a fração de radiação que incide sobre a superfície do bloco e é por ela refletida.

Considerando o bloco como um meio opaco, não há transmissão da energia que incide sobre o bloco por radiação, havendo apenas absorção e a reflexão. Assim, tem-se que:

$$\alpha_{\text{bloco}} + \rho_{\text{bloco}} = 1, \quad (3.7)$$

onde α_{bloco} é a absortividade total do material do bloco, definida como a fração de radiação total que incide sobre o bloco que é por ele absorvida.

Assim, a Equação (3.5), pode ser reescrita em termos da emitância total da superfície e da irradiância total absorvida pelo bloco:

$$q_{\text{rad}} = A_{\text{bloco}} (\alpha_{\text{bloco}} G_{\text{bloco}} - E_{\text{bloco}}) \quad (3.8)$$

A irradiância total que atinge a superfície do bloco, G_{bloco} , proveniente das superfícies do forno, cujas paredes são consideradas corpos negros e são mantidas a diferentes temperaturas, é dada por:

$$A_{\text{bloco}} G_{\text{bloco}} = \sum_{i=1}^N A_i F_{i-\text{bloco}} \sigma T_i^4 \quad i = \text{superfícies do forno}, \quad (3.9)$$

onde A_i é a área da superfície i do forno, $F_{i-\text{bloco}}$ é o fator de forma entre a superfície i e o bloco, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T_i é a temperatura da superfície i .

A emitância total da superfície do bloco, E_{bloco} , é dada por:

$$E_{\text{bloco}} = \epsilon_{\text{bloco}} \sigma T_{\text{bloco}}^4 \quad (3.10)$$

onde ϵ_{bloco} é a emissividade do bloco, definida como a razão entre a radiação emitida pela superfície do bloco e a radiação emitida por um corpo negro a mesma temperatura e T_{bloco} é a temperatura da superfície do bloco.

O fator de forma F_{i-j} é definido como a fração da radiação que sai da superfície i e é interceptada pela superfície j . Para uma cavidade fechada como o forno, pela regra da soma temos que $\sum_{i=1}^N F_{\text{bloco}-i} = 1$ e, pela relação de reciprocidade, $A_i F_{i-j} = A_j F_{j-i}$. Substituindo as Equações (3.9) e (3.10) na Equação (3.8), juntamente com a aplicação da regra da soma e da relação de reciprocidade, e considerando-se a superfície do bloco difusa e cinzenta ($\alpha_{\text{bloco}} = \epsilon_{\text{bloco}}$), a troca líquida de energia por radiação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$q_{\text{rad}} = \sum_{i=1}^N A_{\text{bloco}} F_{\text{bloco}-i} \epsilon_{\text{bloco}} \sigma (T_i^4 - T_{\text{bloco}}^4) \quad (3.11)$$

Se todas as superfícies forem mantidas a uma mesma temperatura T_s , a equação acima se reduz à:

$$q_{\text{rad}} = A_{\text{bloco}} \epsilon_{\text{bloco}} \sigma (T_s^4 - T_{\text{bloco}}^4) \quad (3.12)$$

A troca de calor convectiva, por sua vez, pode ser obtida a partir da expressão:

$$q_{\text{conv}} = A_{\text{bloco}} h_{\text{conv}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{bloco}}) \quad (3.13)$$

onde A_{bloco} é a área da superfície superior do bloco em contato com o ar, em que há expressiva troca de calor por convecção (troca convectiva pelas laterais do bloco desprezada), T_{ar} é a temperatura do ar que circunda o bloco e h_{conv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção.

A troca de calor por condução entre a forma, onde o bloco é depositado e a superfície inferior do bloco é dada por:

$$q_{\text{cond}} = A_{\text{bloco}} \frac{(T_{\text{forma}} - T_{\text{bloco}})}{R_{\text{contato}}}, \quad (3.14)$$

onde T_{forma} é a temperatura do material da forma, em contato com o bloco e R_{contato} é a resistência de contato entre a forma e o bloco. Cabe salientar que a forma encontra-se previamente dentro do forno, estando inicialmente a mesma temperatura que o ar.

A resistência de contato entre uma superfície e o bloco deve-se principalmente aos efeitos de rugosidade da superfície. A transferência de calor se deve, nesse caso, a condução através da área real de contato entre a superfície e o bloco e à condução e/ou radiação através dos espaços preenchidos, nesse caso, com ar. A resistência de contato pode ser diminuída, aumentando-se a área de contato real entre a superfície e o bloco. Uma maneira de se fazer isso é preencher a área interfacial com um fluido de condutividade térmica elevada. Segundo Incropera e Dewitt (1998), embora se tenha proposto teorias para a previsão de R_{contato} , os resultados mais confiáveis são os obtidos experimentalmente.

A troca de calor por condução apresentada na Equação (3.14) pode ser expressa da seguinte forma:

$$q_{\text{cond}} = A_{\text{bloco}} h_{\text{cond}} (T_{\text{forma}} - T_{\text{bloco}}) \quad (3.15)$$

onde,

$$h_{\text{cond}} = \frac{1}{R_{\text{contato}}} \quad (3.16)$$

Como a intenção deste estudo é estimar a contribuição dos diferentes mecanismos de troca térmica na cocção da pizza e tendo-se em vista que a temperatura do ar é função das temperaturas de todas as superfícies (inclusive da temperatura da forma), é conveniente definir-se a taxa de transferência de calor por condução de forma semelhante à convecção, dada pela Equação (3.13). A troca de calor por condução dada pela Equação (3.15) será, então, reescrita em função da diferença de temperatura entre o ar e o bloco.

$$q_{\text{cond}} \equiv A_{\text{bloco}} h_{\text{cond}}^* (T_{\text{ar}} - T_{\text{bloco}}) \quad (3.17)$$

Comparando-se a Equação (3.17) com as Equações (3.15) e (3.16), o coeficiente de transferência de calor por condução modificado, h_{cond}^* , será dado por:

$$h_{\text{cond}}^* = \frac{(T_{\text{forma}} - T_{\text{bloco}})}{R_{\text{contato}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{bloco}})} \quad (3.18)$$

Nota-se que nos casos em que coexistam a transferência de calor por condução e convecção, os coeficientes de transferência de calor h_{conv} e h_{cond}^* são aditivos.

Assim, substituindo-se as Equações (3.11),(3.13) e (3.19), pode-se reescrever a Equação 3.3 da seguinte forma:

$$q_{\text{bloco}} = mc_p \frac{dT_{\text{bloco}}}{dt} \quad (3.19)$$

$$= \sum_{i=1}^N A_i F_{i-\text{bloco}} \varepsilon_{\text{bloco}} \sigma (T_i^4 - T_{\text{bloco}}^4) + A_{\text{bloco}} h_{\text{conv}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{bloco}}) + A_{\text{bloco}} h_{\text{cond}}^* (T_{\text{ar}} - T_{\text{bloco}})$$

A Equação (3.19) é uma equação geral para o acúmulo de energia interna num bloco qualquer dentro do forno aqui estudado e sob a hipóteses já assumidas.

No primeiro caso, assumindo-se que tanto o bloco quanto as paredes do forno comportam-se como corpos negros, cuja emissividade e absorvidade são iguais a 1, o acúmulo de energia no bloco preto é dado por:

$$q_{\text{bloco}}^{\text{preto}} = m c_p \frac{dT_{\text{preto}}}{dt} \quad (3.20)$$

$$= \sum_{i=1}^N A_i F_{i \text{ bloco}} \sigma (T_i^4 - T_{\text{preto}}^4) + A_{\text{bloco}} h_{\text{conv}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{preto}}) + A_{\text{bloco}} h_{\text{cond}}^* (T_{\text{ar}} - T_{\text{preto}})$$

No caso do bloco polido, considerando-se que todo o calor por radiação que atinge sua superfície é refletido ($\alpha_{\text{bloco}} = \epsilon_{\text{bloco}} = 0$), o acúmulo de energia para o bloco é dado por:

$$q_{\text{bloco}}^{\text{polido}} = m c_p \frac{dT_{\text{polido}}}{dt} = A_{\text{bloco}} h_{\text{conv}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{polido}}) + A_{\text{bloco}} h_{\text{cond}}^* (T_{\text{ar}} - T_{\text{polido}}) \quad (3.21)$$

Uma vez que os coeficientes h_{conv} e h_{cond}^* são aditivos, a Equação (3.21) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$q_{\text{bloco}}^{\text{polido}} = m c_p \frac{dT_{\text{polido}}}{dt} = A_{\text{bloco}} h_{\text{global}}^{\text{polido}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{polido}}) \quad (3.22)$$

onde o coeficiente de transferência de calor global é dado por:

$$h_{\text{global}}^{\text{polido}} = h_{\text{conv}} + h_{\text{cond}}^* \quad (3.23)$$

Assim, idealmente, a troca líquida de calor por radiação entre o bloco e o forno é a diferença entre as taxas de aquecimento do bloco preto e do bloco polido, para as mesmas condições iniciais de troca térmica:

$$q_{\text{rad}} = q_{\text{bloco}}^{\text{preto}} - q_{\text{bloco}}^{\text{polido}} = m c_p \frac{dT_{\text{preto}}}{dt} - m c_p \frac{dT_{\text{polido}}}{dt} \quad (3.24)$$

A troca de calor por convecção pode ser estimada diretamente apoiando-se o bloco polido sobre um material de condutividade térmica bastante baixa, de forma que a transferência de calor por condução possa ser desprezada frente à convecção. Nesse caso, o acúmulo de energia no bloco polido será dado apenas pela transferência de calor por convecção, podendo ser expressa pela Equação (3.25):

$$q_{\text{bloco}}^{\text{polido+isol}} = mc_p \frac{dT_{\text{polido}}}{dt} = A_{\text{bloco}} h_{\text{conv}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{polido}}) = q_{\text{conv}} \quad (3.25)$$

O coeficiente de transferência de calor por condução modificado pode ser estimado pela subtração do acúmulo de energia nas condições em que o bloco polido é apoiado sobre um isolante daquela em que o bloco polido é colocado em contato direto com a base. O acúmulo de energia interna no bloco polido colocado em contato com a base do forno deve-se a energia que entra por convecção e por condução, dado pela Equação (3.21). Quando esse mesmo bloco é colocado sobre uma camada de isolante, este acúmulo deve-se somente ao calor transferido por convecção, dado pela Equação (3.25). Assim, subtraindo-se a Equação (3.25) da Equação (3.21) tem-se:

$$q_{\text{cond}} = mc_p \frac{dT_{\text{polido}}}{dt} - mc_p \frac{dT_{\text{polido+isol}}}{dt} = A_{\text{bloco}} h_{\text{cond}}^* (T_{\text{ar}} - T_{\text{polido}}) \quad (3.26)$$

Com o uso dessa técnica, é, então, possível caracterizar os modos de transferência de calor entre o forno e o alimento. Outra forma de se avaliar o comportamento térmico do forno é através dos coeficientes de transferência de calor. Os coeficientes de troca térmica podem ser estimados a partir das respectivas parcelas de calor transferidas ao bloco e são parâmetros necessários para o projeto de fornos e outros equipamentos.

O coeficiente de transferência de calor por convecção, h_{conv} , pode ser estimado integrando-se a Equação (3.25) desde a condição $t=0$ e $T(0)=T_0$ até a condição final. Assim, temos:

$$\frac{T - T_{\text{ar}}}{T_0 - T_{\text{ar}}} = \exp \left[- \left(\frac{h_{\text{conv}} A_{\text{bloco}}}{mc_p} \right) t \right] \quad (3.27)$$

O h_{conv} pode, então, ser determinado pela inclinação da curva de $\log \left(\frac{T - T_{\text{ar}}}{T_0 - T_{\text{ar}}} \right)$ em função do tempo t , onde:

$$\tau = \frac{-h_{\text{conv}} A_{\text{bloco}}}{mc_p} \quad (3.28)$$

é a inclinação da reta obtida.

Isolando-se h_{conv} na Equação (3.28), tem-se um valor médio para o coeficiente de transferência de calor por convecção. Para se estimar os valores de h_{conv} ao longo do processo de aquecimento do bloco, pode-se partir da equação de Fourier para aquecimento

convectivo transiente, $q_{\text{conv}} = m c_p \frac{dT}{dt} = A_{\text{bloco}} h_{\text{conv}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{polido}})$. Utilizando-se a definição de derivada que envolve limite, pode-se obter, para pequenos intervalos de tempo, $\Delta t \rightarrow 0$:

$$h_{\text{conv}} = \frac{m c_p}{A_{\text{bloco}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{polido}})} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{T_{\text{polido}}(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} \approx \frac{m c_p}{A_{\text{bloco}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{polido}})} \frac{\Delta T_{\text{polido}}}{\Delta t} \quad (3.29)$$

onde ΔT_{polido} é a variação de temperatura do bloco num pequeno intervalo de tempo Δt .

Semelhantemente à equação (3.25), o coeficiente de transferência de calor global para o bloco polido é obtido pela integração da Equação (3.22) desde a condição $t=0$ e $T_{\text{bloco}}(0)=T_0$ até a condição final. Assim,

$$\frac{T - T_{\text{ar}}}{T_0 - T_{\text{ar}}} = \exp \left[- \left(\frac{h_{\text{global}}^{\text{polido}} A_{\text{bloco}}}{m c_p} \right) t \right] \quad (3.30)$$

Traçando-se a curva em função de t , estima-se $h_{\text{global}}^{\text{polido}}$ a partir da inclinação da curva obtida, λ , dada por:

$$\lambda = \frac{-h_{\text{global}}^{\text{polido}} A_{\text{bloco}}}{m c_p} \quad (3.31)$$

Da mesma forma que a Equação (3.28), a Equação (3.31) fornece um valor médio para o coeficiente de transferência de calor global. Os valores de $h_{\text{global}}^{\text{polido}}$ ao longo do processo de aquecimento do bloco, são obtidos de:

$$h_{\text{global}}^{\text{polido}} = \frac{m c_p}{A_{\text{bloco}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{polido}})} \frac{\Delta T_{\text{polido}}}{\Delta t} \quad (3.32)$$

onde ΔT_{polido} é a variação de temperatura do bloco no intervalo de tempo, Δt .

Com estes dados, emprega-se a Equação (3.23) para se obter o coeficiente de transferência de calor por condução modificado.

Conforme relata Incropera e Dewitt (1998), em alguns casos é também conveniente expressar a troca de calor por radiação de modo semelhante ao modo convectivo. Isso é possível linearizando-se a equação da taxa de radiação (Equação (3.11), fazendo com que ela seja proporcional a uma diferença de temperatura e não à diferença das quartas

potências de duas temperaturas. A Equação (3.11) pode, então, ser expressa da seguinte forma:

$$q_{\text{rad}} = A_{\text{bloco}} \sum_i^N h_{\text{rad},i} (T_i - T_{\text{bloco}}) \quad (3.33)$$

onde, o coeficiente de transferência de calor por radiação relacionada à superfície i , $h_{\text{rad},i}$ é:

$$h_{\text{rad},i} = F_{\text{bloco} \rightarrow i} \epsilon_{\text{bloco}} \sigma (T_i^2 + T_{\text{bloco}}^2) (T_i + T_{\text{bloco}}) \quad (3.34)$$

É fácil notar que se as temperaturas de todas as superfícies do forno forem iguais a uma temperatura T_s , a Equação 3.21 será dada por:

$$q_{\text{rad}} = A_{\text{bloco}} h_{\text{rad}} (T_s - T_{\text{bloco}}) \quad (3.35)$$

onde,

$$h_{\text{rad}} = \sum_i^N h_{\text{rad},i} = \epsilon_{\text{bloco}} \sigma (T_s^2 + T_{\text{bloco}}^2) (T_s + T_{\text{bloco}}) \quad (3.36)$$

Observa-se, no entanto, que h_{rad} depende fortemente das temperaturas das superfícies e do bloco, enquanto que no coeficiente de transferência de calor por convecção e por condução essa dependência é fraca. Assim, o coeficiente de transferência de calor por convecção e por condução podem ser considerados aproximadamente constantes durante todo o processo, porém, na maioria dos casos, o coeficiente de transferência de calor por radiação, não.

As Equações (3.33) e (3.35) mostram que a parcela de calor transferida por radiação é proporcional à diferença de temperatura entre as superfícies do forno e o bloco. Porém, no caso da parcela convectiva, essa diferença de temperatura se dá entre o ar e o bloco. Como se verá mais adiante, é conveniente expressar o coeficiente de troca térmica radiativa em termos das temperaturas do bloco e do ar. Isto é possível, porque, por hipótese, o forno é completamente isolado externamente e todas as trocas térmicas ocorrem entre as superfícies internas do forno e o ar. Assim, as temperaturas do ar são funções das temperaturas das superfícies do forno. Além disto, como a soma das áreas das superfícies do forno é muito maior do que a do bloco, a temperatura do ar permanece próxima à temperatura da parede. Define-se, então, o seguinte coeficiente de transferência de calor por radiação modificado:

$$q_{\text{rad}} \equiv A_{\text{bloco}} h_{\text{rad}}^* (T_{\text{ar}} - T_{\text{bloco}}) \quad (3.37)$$

Comparando-se a Equação (3.37) com a Equação (3.11), o coeficiente de transferência de calor por radiação é, agora, dado pela seguinte expressão, que contém as temperaturas das paredes T_i , do ar T_{ar} e do bloco, T_{bloco} , todas interdependentes:

$$h_{\text{rad}}^* = \frac{\sum_{i=1}^N F_{\text{bloco}-i} \epsilon_{\text{bloco}} \sigma (T_i^4 - T_{\text{bloco}}^4)}{(T_{\text{ar}} - T_{\text{bloco}})} \quad (3.38)$$

Ou, para o caso de todas as superfícies estarem à mesma temperatura T_s :

$$h_{\text{rad}}^* = \frac{\epsilon_{\text{bloco}} \sigma (T_s^4 - T_{\text{bloco}}^4)}{(T_{\text{ar}} - T_{\text{bloco}})} \quad (3.39)$$

O acúmulo de energia interna no bloco preto, aquecido em um forno cujas superfícies encontram-se a mesma temperatura, T_s , dado pela Equação (3.20) pode ser reescrito da seguinte forma:

$$q_{\text{bloco}}^{\text{preto}} = A_{\text{bloco}} h_{\text{conv}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{preto}}) + A_{\text{bloco}} h_{\text{rad}}^* (T_{\text{ar}} - T_{\text{preto}}) + A_{\text{bloco}} h_{\text{cond}}^* (T_{\text{ar}} - T_{\text{preto}}) \quad (3.40)$$

Assim, empregando-se as definições dos coeficientes de transferência de calor por radiação e por condução anteriores, estes se tornam aditivos ao coeficiente de transferência de calor por convecção, ou seja:

$$q_{\text{bloco}}^{\text{preto}} = mc_p \frac{dT_{\text{preto}}}{dt} = A_{\text{bloco}} (h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}^* + h_{\text{cond}}^*) (T_{\text{ar}} - T_{\text{preto}}) \quad (3.41)$$

A Equação (3.41) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$q_{\text{bloco}}^{\text{preto}} = mc_p \frac{dT_{\text{preto}}}{dt} = A_{\text{bloco}} h_{\text{global}}^{\text{preto}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{preto}}) \quad (3.42)$$

onde,

$$h_{\text{bloco}}^{\text{preto}} = h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}^* + h_{\text{cond}}^* \quad (3.43)$$

Conforme foi feito para o coeficiente de transferência de calor global para o bloco polido, o $h_{\text{global}}^{\text{preto}}$, pode ser estimado pela integração da Equação (3.42) desde a condição $t=0$ e $T_{\text{bloco}}(0)=T_i$ até a condição final. Assim, traçando-se a curva $[(T - T_{\text{ar}})/(T_0 - T_{\text{ar}})]$ em função de t , estima-se $h_{\text{global}}^{\text{preto}}$ a partir da inclinação da curva obtida, η , dada por:

$$\eta = \frac{-h_{\text{global}}^{\text{preto}} A_{\text{bloco}}}{mc_p} \quad (3.44)$$

Valores para o coeficiente de transferência de calor global para o bloco preto ao longo do processo de aquecimento podem ser obtidos de forma semelhante a Equação (3.32), onde T_{polido} é substituída por T_{preto} , ou seja:

$$h_{\text{global}}^{\text{preto}} = \frac{mc_p}{A_{\text{bloco}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{preto}})} \frac{\Delta T_{\text{preto}}}{\Delta t} \quad (3.45)$$

onde ΔT_{preto} é a variação de temperatura do bloco no intervalo de tempo, Δt .

O “coeficiente de transferência de calor por radiação modificado” pode ser estimado subtraindo-se a Equação (3.23) da Equação (3.43).

Portanto, no presente caso, apresentam-se duas maneiras de se estimar a contribuição da radiação, pelo cálculo do coeficiente de transferência de calor por radiação: utilizando a Equação (3.34) ou (3.36), ou utilizando a seguinte expressão:

$$h_{\text{rad}}^* = \frac{q_{\text{rad}}}{A_{\text{bloco}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{preto}})} = \frac{1}{A_{\text{bloco}}} \left[\frac{mc_p \frac{dT_{\text{preto}}}{dt} - mc_p \frac{dT_{\text{polido}}}{dt}}{(T_{\text{ar}} - T_{\text{preto}})} \right] \quad (3.46)$$

Nota-se que, enquanto é necessário conhecer a temperatura da superfície da cavidade na Equação (3.34) e (3.36), na Equação (3.46) basta comparar o comportamento térmico dos blocos para se ter uma estimativa dos coeficientes de troca térmica radiativa. Esta técnica é uma técnica aproximada para a obtenção dos coeficientes de troca térmica. Milanez e Mantelli (2006) reportam sucesso no emprego desta técnica em um forno de cocção doméstico.

Para a quantificação dos modos de transferência de calor por radiação, convecção e condução, foi realizada uma série de experimentos. A configuração e as condições de operação do forno foram ajustadas de acordo com as conclusões obtidas para as Etapas I e

II da *Determinação das Condições de Cocção da Pizza*. Sob estas condições foi obtida a temperatura em função do tempo para o bloco preto, para o bloco polido (de cor prata) e para o bloco polido apoiado sobre uma camada de material isolante.

Anteriormente à quantificação dos modos de transferência de calor propriamente dita, foi realizado um experimento cujo objetivo foi verificar a validade do método da capacitância global para a técnica dos blocos. A condução desta etapa de verificação é descrita a seguir.

3.5.1.1 Validade do método da capacitância global

Segundo Incropera e Dewitt (1998), o método da capacitância global é, devido sua simplicidade, o método preferido a ser adotado em problemas de condução transiente. No entanto, é necessário determinar em quais condições esse método pode ser usado com boa exatidão. Conforme já foi mencionado, a essência desse método é a hipótese assumida de que o bloco de alumínio é isotérmico, ou seja, de que a temperatura no sólido é espacialmente uniforme em qualquer instante do processo transiente. No caso do bloco utilizado, sabe-se que a condução é na realidade tridimensional, podendo ser modelada em termos das coordenadas cilíndricas r , Θ e z do bloco. O interesse é verificar se a distribuição de temperatura no bloco, com a posição e o tempo, $T(r, \theta, z, t)$ é significativa, de forma que a hipótese de distribuição uniforme não possa ser aplicada. Uma solução teórica para esta distribuição poderia não ser eficiente, uma vez que o calor trocado pela resistência térmica de contato na base do bloco é muito difícil de ser modelada, podendo ser não uniforme ao longo da área de contato. Para se verificar a hipótese de o bloco ser isotérmico, ou seja, $T(r, \theta, z, t) \approx T(t)$, um experimento foi projetado e conduzido conforme será descrito a seguir.

Os experimentos foram realizados utilizando-se um bloco de alumínio com dimensões aproximadas às da pizza: $31,0 \pm 0,05$ cm de diâmetro e $1,3 \pm 0,05$ cm de espessura. Este bloco é o mesmo que foi utilizado nos testes para a determinação dos coeficientes de transferência de calor. Quatro termopares tipo K foram inseridos no bloco para a aquisição de temperatura, conforme mostra a Figura 3.15.

Pode-se observar que cada termopar representa uma posição no interior do bloco, relacionada com a combinação do raio (R_B) e com o ângulo no seu interior (Θ_B), conforme mostra a Figura 3.15. No entanto, a posição em que o bloco é acomodado no interior do forno poderá também influenciar no gradiente de temperatura, caso a temperatura do forno não seja homogênea. Assim, tanto a influência da posição do termopar no interior do bloco quanto da posição angular do bloco no interior do forno foram avaliadas.

A posição do bloco no interior do forno (e conseqüentemente, dos termopares dentro do forno) foi, então, definida pelos fatores Θ_F e x_F , respectivamente, ângulo e posição longitudinal no qual o bloco é posicionado no forno (Figura 3.15c), enquanto a posição do termopar dentro do bloco foi definida pelos fatores Θ_B e R_B , ângulo e raio do bloco. Tanto o raio e o ângulo do bloco, R_B e Θ_B , quanto a posição longitudinal e o ângulo do bloco no interior do forno, x_F e Θ_F , foram estudados em dois níveis: baixo, representado pelo sinal negativo (-) e alto, representado pelo sinal positivo (+). O nível baixo e alto, respectivamente, foram de 6 cm e 13 cm, tanto para o raio do bloco quanto para a posição longitudinal do bloco no interior do forno. Por sua vez, os ângulos, em nível baixo e alto, foram de 0° e 180° , tanto para o bloco quanto para o forno. Essas medidas foram tomadas em relação a um eixo central comum ao bloco e ao forno.

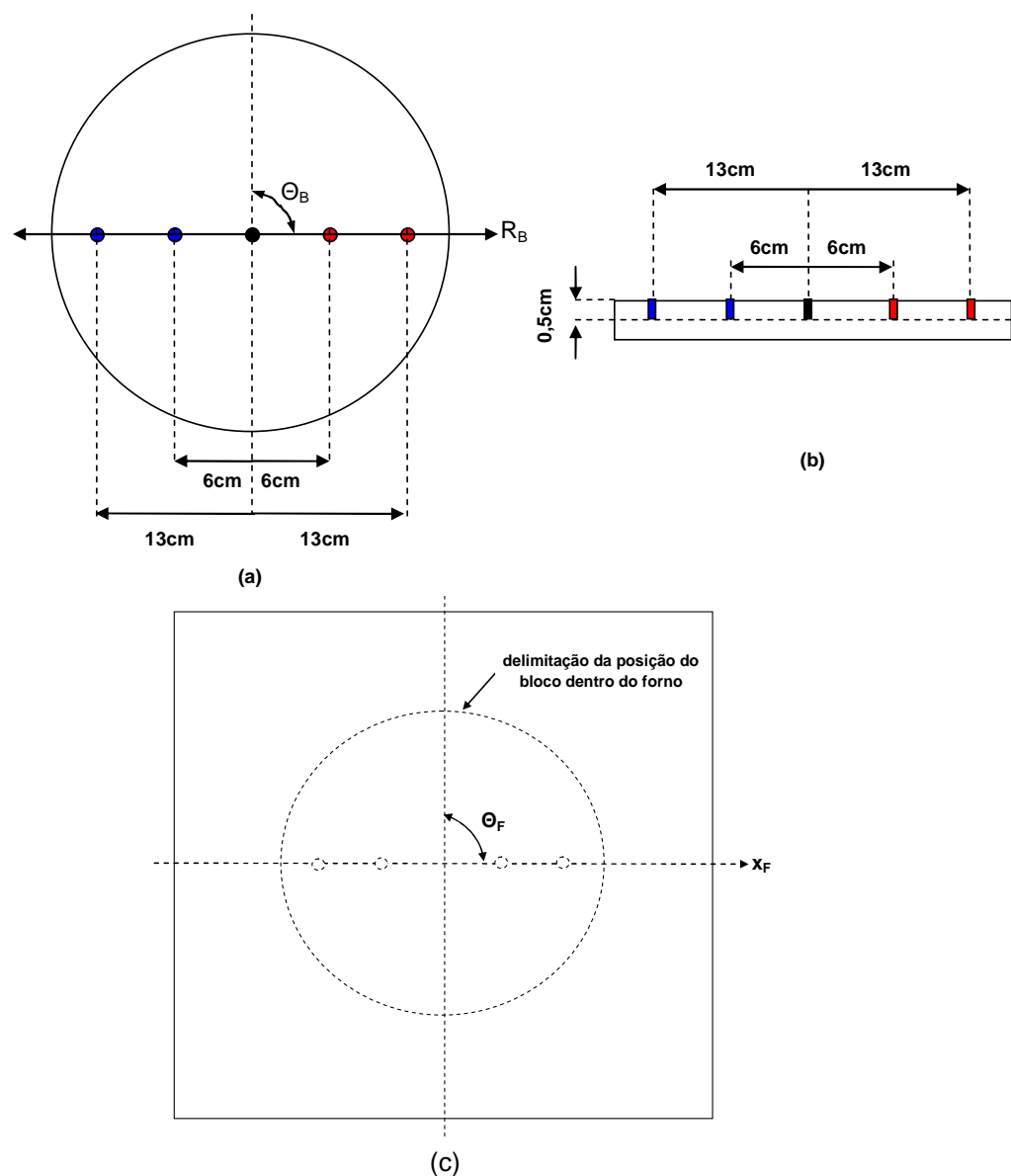


Figura 3.15 – Posicionamento dos termopares no interior do bloco: (a) vista superior, (b) vista lateral e (c) esquema do posicionamento do bloco no interior do forno.

Foram necessários, no total, três ensaios para que os dados referentes a um planejamento fatorial fracionado 2_{IV}^{4-1} (planejamento de resolução IV) fossem obtidos com a combinação desses quatro fatores. Em cada ensaio, o bloco de alumínio foi colocado no forno pré-aquecido nas condições determinadas anteriormente e a temperatura de cada termopar foi registrada. Cada ensaio correspondeu a uma posição do bloco dentro do forno.

A Figura 3.16 esquematiza, para cada ensaio, a posição em que o bloco foi colocado dentro do forno. Por conveniência, essa figura traz apenas uma representação do bloco e da superfície inferior, sobre a qual o bloco foi apoiado. É importante observar que o eixo horizontal sobre o qual os termopares foram fixados no bloco coincide com o eixo demarcado no forno cujas posições sobre ele são estudadas. Note que na posição 1, a posição de cada termopar no interior do bloco, dada pela combinação de R_B e Θ_B , coincide com a posição do bloco no interior do forno dado pela combinação dos mesmos valores de x_F e Θ_F . Na posição 2, gira-se o bloco em 180° e o desloca para a direita, de modo que cada termopar passa a ocupar outra posição no interior do forno (a posição do termopar no interior do bloco é fixa). O termopar 2, por exemplo, cuja posição no interior do bloco é $R_B(-)$ e $\Theta_B(-)$, ocupa na posição 1 a posição $x_F(-)$ e $\Theta_F(+)$. Na posição 2, por sua vez, sua posição no interior do forno ocupa agora a posição $x_F(+)$ e $\Theta_F(-)$. Na posição 3, o bloco é girado em 180° em relação a posição 1 e deslocado para a esquerda.

A combinação dos fatores nas diferentes posições, tanto no interior do bloco quanto no forno, são apresentadas na Figura 3.17 (a) e (b). A Tabela 3.3 apresenta o planejamento experimental fracionado com a combinação dos fatores: (A) Θ_B , (B) R_B , (C) Θ_F e (D) x_F , bem como, as posições do bloco e dos termopares correspondentes a cada combinação. A relação de definição utilizada nesse planejamento foi $I = ABCD$.

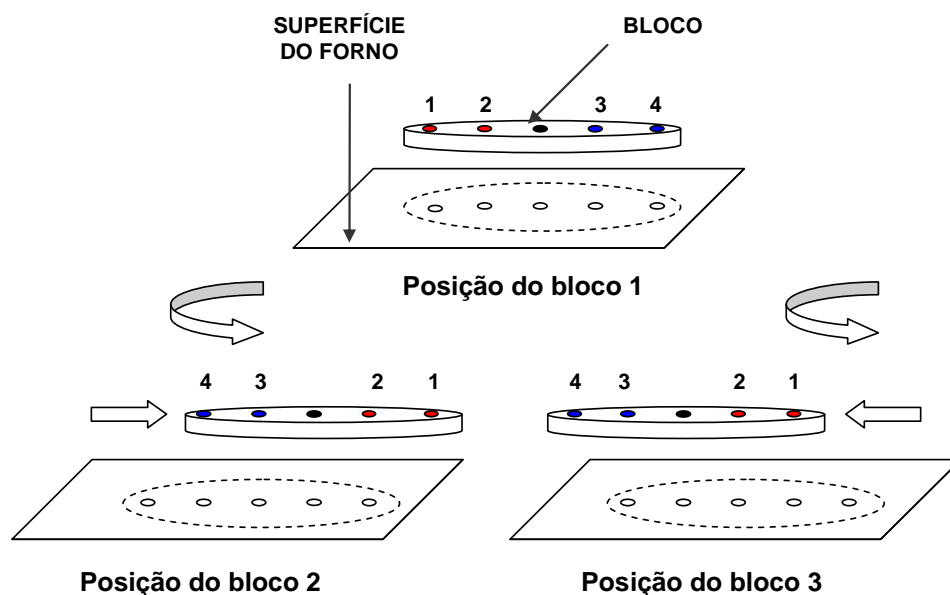


Figura 3.16 – Esquema da posição do bloco em casa ensaio.

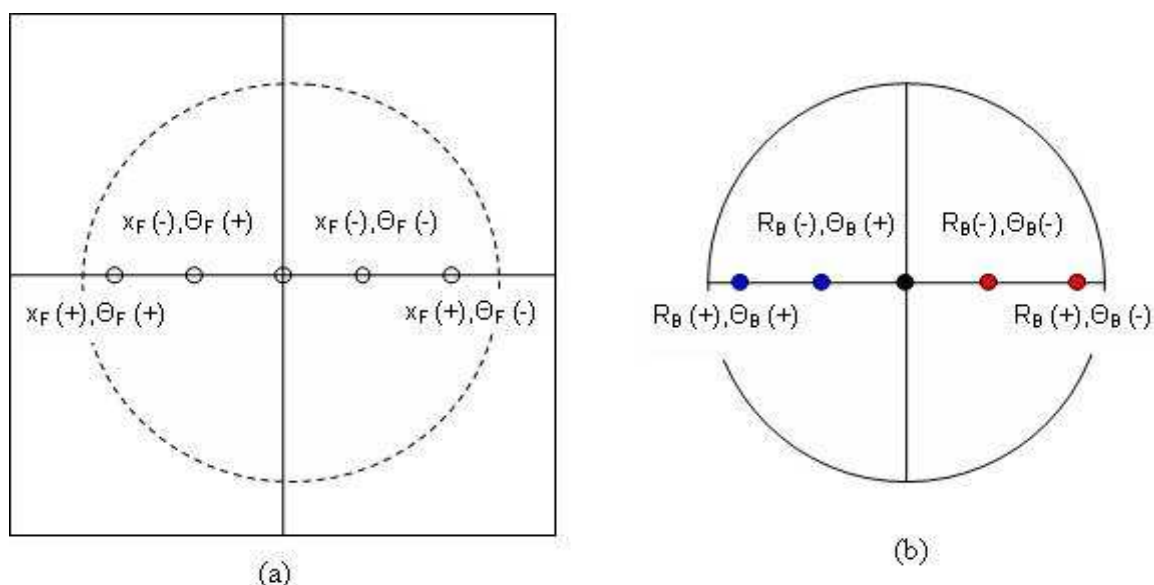


Figura 3.17 – Posição do bloco no interior do forno (a) e posição dos termopares no interior do bloco (b).

Tabela 3.3 – Combinação dos fatores R_B , Θ_B , R_F e Θ_F para o planejamento fatorial fracionado 2_{IV}^{4-1} e posição do bloco e do termopar correspondentes.

Combinação	Posição do bloco no forno	Posição do termopar no bloco	Fatores			
			(A) R_B	(B) Θ_B	(C) x_F	(D) Θ_F
1	1	3	-	-	-	-
2	2	4	+	-	-	+
3	1	2	-	+	-	+
4	3	1	+	+	-	-
5	3	3	-	-	+	+
6	1	4	+	-	+	-
7	2	2	-	+	+	-
8	1	1	+	+	+	+

Para cada combinação apresentada na tabela acima, traçou-se uma curva de temperatura em função do tempo. A hipótese de que todas as curvas podem ser consideradas iguais e, conseqüentemente, o bloco considerado isotérmico, foi avaliada com base em três respostas: T_{ij} , temperaturas em $t_1=5$, $t_2=10$, $t_3=15$, $t_4=30$, $t_5=45$ e $t_6=60$ minutos para cada ensaio; c_{ik} , coeficientes da equação de cada uma das curvas; e A_i , áreas abaixo dessas curvas. Os coeficientes foram determinados com auxílio do programa *Microsoft Excel*, ajustando-se a cada curva um polinômio de quinto grau. Assim, obtiveram-se para cada uma das curvas 5 coeficientes. A área abaixo de cada uma das curvas foi obtida pela integração do polinômio ajustado. As hipóteses nulas, H_0 , que se deseja testar para cada uma dessas respostas e as hipóteses alternativas, H_1 , são apresentadas a seguir:

Hipóteses nulas:

$$H_{0(1)} : T_{i1} = T_{i2} = \dots = T_{ij}$$

$$H_{0(2)} : c_{i1} = c_{i2} = \dots = c_{ij}$$

$$H_{0(3)} : A_1 = A_2 = \dots = A_i$$

Hipóteses alternativas:

$$H_{1(1)} : T_{ij} \neq T_{kj}$$

$$H_{1(2)} : c_{ij} \neq c_{in}$$

$$H_{1(3)} : A_i \neq A_k$$

onde $i = 1..k$ corresponde aos tempos em que as temperaturas foram obtidas, $j = 1..n$ corresponde às combinações apresentadas na tabela acima e $l=1..p$ corresponde aos coeficientes do polinômio de quinto grau das curvas ajustadas.

Outro critério a ser utilizado para se verificar a validade do método da capacitância global é pelo cálculo do número de Biot (Bi). Esse parâmetro adimensional tem papel fundamental nos problemas de condução envolvendo efeitos de convecção superficial. O número de Biot proporciona uma medida da queda ou aumento de temperatura do sólido em relação à diferença de temperatura entre a superfície e o fluido. (INCROPERA, DEWITT, 1998). O número de Biot para o bloco é, então, definido como:

$$Bi \equiv \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{h_{conv} L_c}{k_{bloco}} \quad (3.47)$$

onde R_{cond} e R_{conv} são, respectivamente, as resistências à transferência de calor por condução e por convecção; h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, k é a condutividade do material e L_c , o comprimento característico. O comprimento característico é igual à razão entre o volume do sólido e sua área superficial, $L_c = \frac{V_{bloco}}{A_{bloco}}$.

Sendo o número de Biot a razão entre as resistências à transferência de calor por condução e por convecção, torna-se razoável admitir que, em condições correspondentes a $Bi \ll 1$, há uma distribuição uniforme de temperatura através do sólido em qualquer tempo do regime transiente, pois *a resistência no interior do sólido é muito menor do que a resistência à convecção através da camada limite do fluido*. (INCROPERA e DEWITT, 1998). Assim, se $Bi \ll 1$, o gradiente de temperatura no sólido é pequeno e $T(z, t) \approx T(t)$; praticamente toda a diferença de temperatura é entre o sólido e o fluido, e a temperatura do sólido permanece aproximadamente uniforme conforme se aproxima da temperatura do fluido.

Portanto, segundo Incropera e Dewitt (1998), diante de problemas de condução transiente, a primeira coisa a se fazer é o cálculo do número de Biot. Se $Bi < 0,1$, o erro associado à adoção do método da capacitância global será pequeno.

3.6 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA MASSA DE PIZZA

As propriedades termofísicas determinadas neste estudo foram: difusividade térmica e condutividade térmica. Serão apresentadas a seguir as metodologias empregadas para a determinação dessas duas propriedades, com base na revisão da literatura apresentada.

As pizzas foram adquiridas diretamente do fornecedor, todas de um mesmo lote no sabor muçarela. Devido à impossibilidade de ser obter a formulação da massa da pizza, optou-se por fornecer aqui a composição centesimal (ou percentual) obtida da tabela nutricional apresentada na embalagem e determinar a umidade inicial (não fornecida na tabela nutricional). A umidade foi determinada, através do método IAL (2005), pelo Laboratório de Análises (LABCAL) do Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos da UFSC. O teor de cinzas foi determinado pela diferença em relação aos demais componentes.

A composição centesimal, em massa, do produto é fornecida na tabela abaixo.

Tabela 3.4 – Composição centesimal da massa de pizza.

<i>Componente</i>	<i>%</i>
Carboidratos	52,50
Proteínas	7,50
Gordura total	4,00
Fibra alimentar	2,50
Umidade	27,75
Teor de cinzas	5,75

3.6.1 Difusividade térmica

A difusividade térmica da massa da pizza foi determinada pelo método da curva de penetração de calor, descrita no Capítulo II. Em um recipiente cilíndrico, confeccionado com um tubo de cobre de 22 cm de altura, 5,2 cm de diâmetro e 0,1 cm de espessura de parede, foi colocada a massa de pizza à temperatura ambiente e, pela parte superior deste, foi inserido um termopar no centro geométrico desta amostra, conforme ilustra a Figura 3.18. As extremidades do cilindro foram fechadas com teflon, evitando-se, assim, fluxo de calor no eixo axial. O cilindro foi, então, imerso em um banho com temperatura controlada de 70°C e sob agitação. Foram registradas as temperaturas em função do tempo do banho, da parede

do cilindro e do centro geométrico da amostra simultaneamente, com intervalos de 2 segundos.

O aparato experimental é composto, ainda, por placa de aquisição de dados HP 34970AA, caixa isotérmica, computador e por um criostato Lauda Máster Proline RP855, responsável pelo aquecimento e agitação da água.

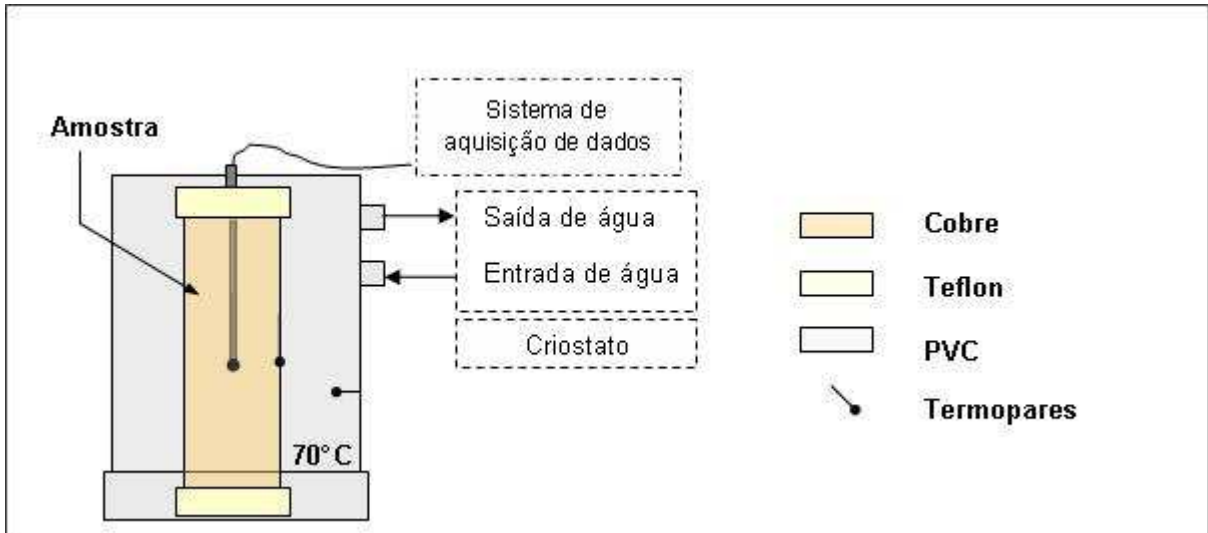


Figura 3.18 – Aparato experimental para determinação da difusividade térmica da amostra.

Com os dados de temperatura do banho e da amostra, são traçadas gráficos do logaritmo ($\log [(T_C - T_\infty)/(T_0 - T_\infty)]$), em função do tempo. A inclinação, m , da parte linear desta curva é utilizada para o cálculo da difusividade térmica da amostra, pelo método de Ball e Olson (1957), pelas seguintes relações:

$$f_h = -\frac{1}{m} \quad (3.48)$$

e,

$$\alpha = \frac{2,303}{\left(\frac{5,783}{R_{cil}^2}\right) f_h} \quad (3.49)$$

onde f_h é a taxa de aquecimento determinada experimentalmente e R_{cil} é o raio do cilindro contendo a amostra.

3.6.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica será determinada pelo método da sonda linear de aquecimento, apresentado no Capítulo II. O princípio da sonda linear baseia-se em uma fonte de calor linear de comprimento infinito com fluxo de calor axial desprezível. A sonda, o recipiente contendo a amostra (mesmo utilizado na determinação da difusividade térmica) e tempo de duração dos testes foi projetado de forma a minimizar os erros associados ao seu uso.

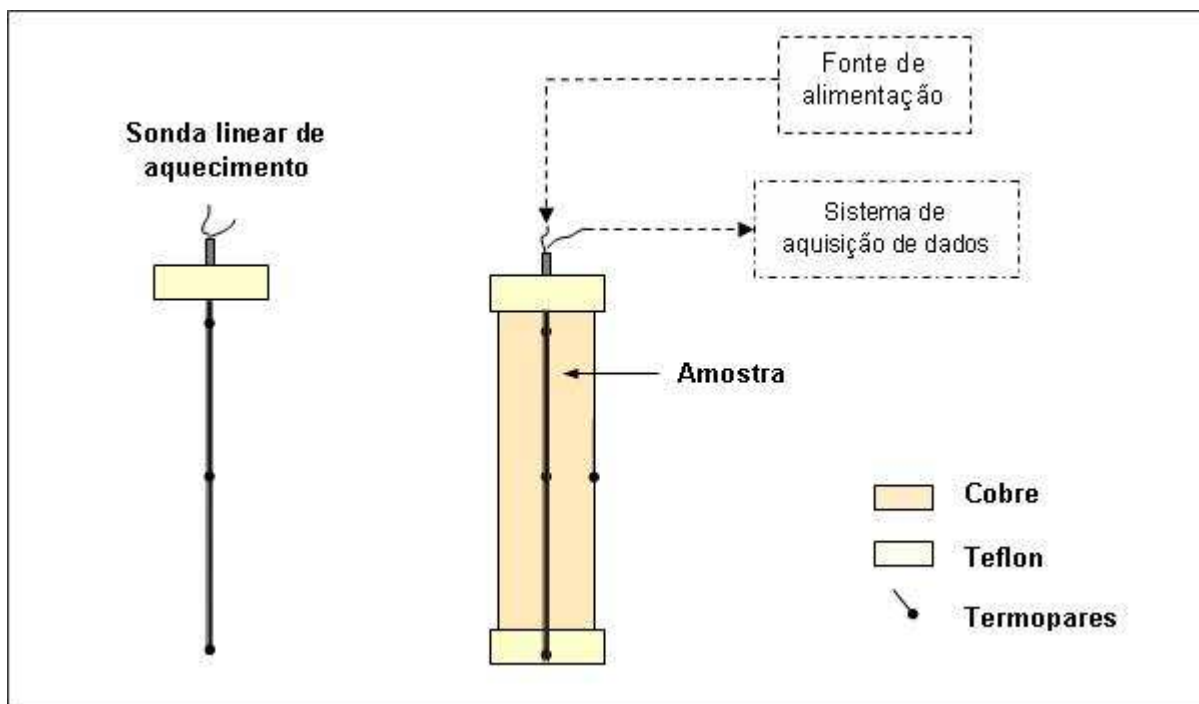


Figura 3.19 – Aparato experimental para determinação da condutividade térmica da amostra.

O aparato experimental é composto pela sonda, por uma fonte de alimentação SME Instrumentos, placa de aquisição de dados HP 34970AA, caixa térmica e um computador.

O programa utilizado para a leitura e conversão dos sinais, tanto na determinação da condutividade térmica, quanto na da difusividade térmica, foi o LabVIEW 8.5. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2008).

A sonda linear de aquecimento é inserida no tubo cilíndrico contendo a amostra. É aguardado tempo necessário para que a temperatura da amostra entre em equilíbrio com a temperatura ambiente. Em seguida, a fonte de alimentação é ligada e o aquecimento da sonda e a temperatura adjacente a ela são monitorados simultaneamente. Com base nesses dados são traçados gráficos do aumento de temperatura da sonda em função do logaritmo neperiano do tempo ($\ln(t/t_0)$). O aumento de temperatura da sonda está diretamente relacionado à condutividade térmica da amostra e é obtido da seguinte equação (MURAKAMI et al., 1996):

$$k = \frac{Q_{sonda}}{4\pi} \frac{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)}{(T - T_0)}, \quad (3.50)$$

onde Q_{sonda} é o calor dissipado por unidade de comprimento da sonda, t e t_0 e T e T_0 definem o intervalo de tempo e temperatura onde a região da curva é linear.

3.6.2.1 Calibração da sonda

A sonda foi inserida num recipiente, o mesmo utilizado para a amostra, com glicerina P.A. para calibração. A glicerina, cujo valor da condutividade térmica a 28°C é de 0,285W/mK (PERRY,1997), foi utilizada na calibração. A glicerina é bastante indicada para a calibração por minimizar os efeitos convectivos de transferência de calor com a sonda. Um vez inserida no recipiente, ajustou-se a fonte de alimentação para fornecer um valor fixo de potência dissipada pelo fio aquecedor, anotando-se o valor da tensão e da corrente. A aquisição de temperatura foi iniciada ao mesmo tempo em que a fonte foi ligada. O valor da potência fornecida pelo fio aquecedor, $P_{fioaquecedor}$, foi calculada através da seguinte equação:

$$P_{fioaquecedor} = Ui, \quad (3.51)$$

onde U é a tensão e i é a corrente fornecida pela fonte de alimentação.

O calor introduzido na amostra, pela sonda, é geralmente reportado em unidade de potência por unidade de comprimento da sonda. Assim, a potência fornecida pelo fio aquecedor foi transformada em potência por unidade de comprimento de fio aquecedor e o calor foi, ainda, transformado em unidade de potência por comprimento da sonda, conforme é apresentado na Equação (3.52):

$$Q_{sonda} = \frac{P_{fioaquecedor}}{L_{fioaquecedor}} \frac{L_{fio-sonda}}{L_{sonda}} \quad (3.52)$$

onde Q_{sonda} é o fluxo de calor dissipado por unidade de comprimento da sonda, $L_{fioaquecedor}$ é o comprimento total do fio aquecedor, $L_{fio-sonda}$ é o comprimento do fio aquecedor inserido na sonda e L_{sonda} é o comprimento da sonda.

Na calibração da sonda com glicerina e nos demais ensaios, a temperatura foi registrada a cada 2 segundos. Após ser calibrada, a valor da corrente foi fixado e a sonda foi utilizada na massa da pizza.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões do trabalho realizados, bem como, as dificuldades encontradas durante a sua execução.

A análise estatística dos dados foi realizada utilizando-se o programa estatístico *Minitab® Statistical Software 15* (MINITAB INC., 2007).

4.1 QUALIDADE SENSORIAL

Para a avaliação da qualidade sensorial da pizza, foram definidos previamente os atributos de qualidade sensorial a serem estudados e construída uma escala padrão para se avaliar a cor da pizza.

4.1.1 Definição dos atributos de qualidade sensorial estudados

Dentre os atributos sensoriais que podem estar presentes em pizzas, foram selecionados três que guiaram este estudo em relação qualidade: cor, textura da borda e elasticidade da massa. A importância de cada um desses atributos sobre a qualidade da pizza para os consumidores foi avaliada pelo Teste de Ordenação, com nível de significância igual a 5%. Neste teste, 100 julgadores ($n=100$), 50% homens e 50% mulheres, foram solicitados a atribuir notas para cor, textura da borda e elasticidade da massa segundo o grau de importância que cada um deles representa na sua avaliação pessoal sobre qualidade da pizza; nota 1 representando o maior grau de importância para o atributo e nota 3, o menor. Os resultados da pesquisa são apresentados na Tabela D1.1, Apêndice D1.

A Figura 4.1 apresenta um histograma com a distribuição das freqüências relativa das notas para cada atributo. A freqüência relativa é a razão entre o número de respostas obtidas para cada atributo e o número de respostas totais.

A Tabela 4.1 apresenta o cálculo das médias obtidas das 100 avaliações para cada um dos atributos.

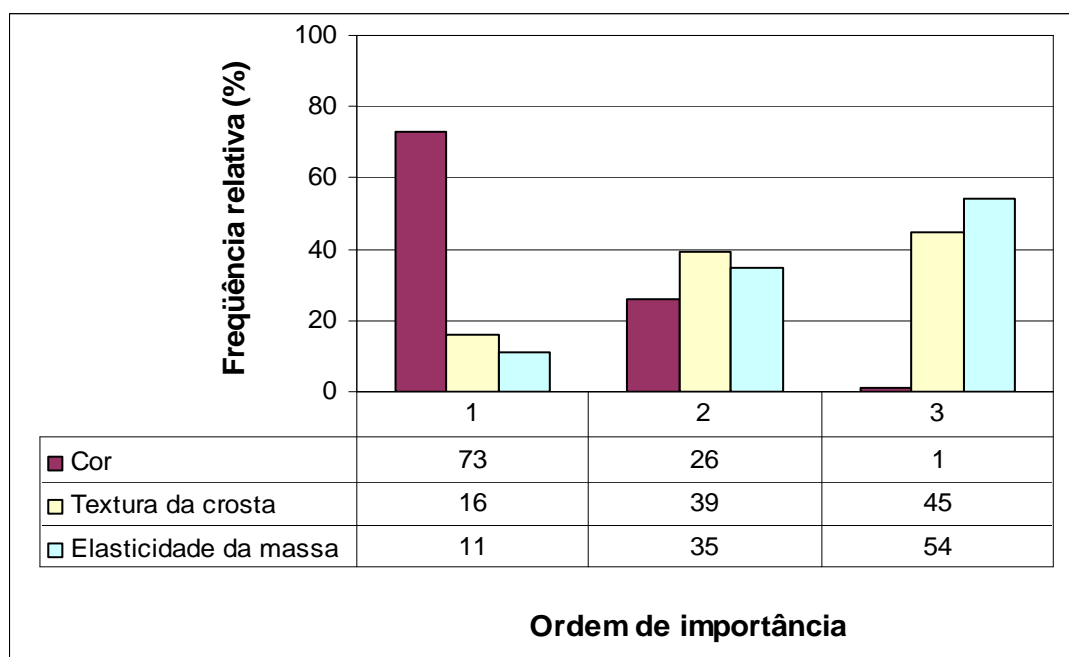


Figura 4.1 – Distribuição das frequências relativas referentes aos atributos de qualidade da pizza.

Tabela 4.1 – Cálculo das médias, análise de variância, com nível de significância de 5%, para os dados obtidos no estudo da seleção dos atributos de qualidade da pizza.

<i>Atributos</i>	<i>n</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
Cor	100	1,28	0,4731
Textura da borda	100	2,29	0,7288
Elasticidade da massa	100	2,43	0,6854

Pela Figura 4.1 observa-se que a cor é o atributo de maior importância na avaliação da qualidade da pizza pelos consumidores. O segundo atributo de maior importância não pode ser determinado com confiança pela Figura 4.1, pois os valores da frequência relativa das respostas para a textura da borda e elasticidade da massa são bastante próximos. Dessa forma, é necessário proceder-se com uma análise de variância seguida do teste de Tukey. A análise de variância dos resultados é apresentada na Tabela D1.2, Apêndice D1, e visa fundamentalmente verificar se não existe uma diferença significativa entre as médias (hipótese nula) e o teste de Tukey, identificar entre quais médias se dá a diferença, caso ela exista.

Pela Figura 4.1 é nítido que há diferença entre as médias dos tratamentos, o que é confirmado pela análise de variância. A análise de variância realizada para a escolha dos atributos de qualidade da pizza apresentou um valor $F_0=96,4$, muito superior ao $F_{crit} = 3,03$. Esta mesma conclusão é atingida pela avaliação do nível descritivo, valor-p, muito abaixo de

5% (nível de significância escolhido). Na análise de variância, o valor p resume o que os dados informam sobre a credibilidade da hipótese nula (H_0), ou seja, para este caso, de que todos os atributos foram considerados igualmente importantes na avaliação dos julgadores. H_0 é rejeitada se o valor- p é menor que o nível de significância especificado no teste. Rejeita-se, então, a hipótese nula; existe pelo menos um par de atributos que difere quanto a essa avaliação de preferência pelos julgadores em relação à qualidade. O teste de Tukey, apresentado na mesma tabela, verifica onde está essa diferença. Pela aplicação da Equação (A.26), do Apêndice A, com nível de significância, $\alpha=0,05$, número de tratamentos, $a=3$, e graus de liberdade do resíduo, $gl = 297$, a diferença crítica entre as médias é de $q_{0,05}(3,297)=0,21$ (valor obtido da tabela contida no Anexo A). Assim, para um par de amostras ter suas médias consideradas estatisticamente diferentes, a diferença absoluta dos seus valores deve ser superior a 0,21. Pela subtração das médias apresentadas na Tabela 4.1, conclui-se que há diferença significativa entre a avaliação da cor e da textura da borda e da elasticidade da massa, cujas diferenças entre as médias são 1,01 e 1,15, respectivamente. No entanto, a avaliação da textura da borda e a avaliação da elasticidade da massa são consideradas iguais, pois a diferença entre as médias é de 0,14.

A avaliação desses atributos durante o estudo foi realizada através de análise sensorial, descrita no Capítulo III. Dentre os atributos escolhidos, a elasticidade da massa foi a de mais difícil avaliação. Amostras servidas em temperaturas abaixo da temperatura de consumo, podendo ocasionar o enrijecimento de sua textura, e quantidade limitada de amostras por julgador, foram algumas dificuldades encontradas na avaliação desse atributo. Cerca de 50 julgadores não treinados seriam necessários para se obter dados confiáveis. Como era assada uma pizza por vez e de cada pizza, obtidas cerca de 10 amostras (fatias de 2 cm x 10 cm), um grande número de pizzas e longo tempo seria requerido para se obter esses dados. Além disso, o LABTUCAL não apresenta condições físicas para o treinamento de panelistas.

Devido a essas dificuldades e ao erro que poderiam atribuir à avaliação da elasticidade da massa, optou-se por avaliar somente a cor e a textura da borda, uma vez que essa última teve o mesmo grau de importância com relação à qualidade de pizzas consideradas pelos consumidores.

Dentre esses três atributos, a cor, com 73% de preferência com relação à qualidade de pizzas, conduzirá as tomadas de decisões com relação à qualidade sensorial. A textura da borda, representando 16% dessa preferência, será avaliada com o intuito de auxiliar as tomadas de decisão, sem, no entanto, ser um fator determinante da qualidade sensorial.

Além desses dois atributos, foi verificada a perda de água da pizza. Essa perda de água foi associada à textura da massa e à sua cor e será apresentada adiante.

4.1.2 Construção da escala padrão de cor

Para a determinação da cor das pizzas que serão analisadas posteriormente, foi desenvolvida uma escala padrão de cor contendo os limites de rejeição e aceitação para a cor da pizza. Para o desenvolvimento dessa escala, uma única pizza foi assada em diferentes tempos: 0 (crua), 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 e 36 minutos, em forno elétrico, modelo Fischer, a 200°C e, após cada um desses tempos de cocção, foi fotografada e codificada. As fotos foram, então, enviadas a 68 julgadores (n=68), juntamente com uma ficha de avaliação sensorial, para o *teste de aceitação*, utilizando-se escala hedônica de 5 pontos (1=desgostei muito a 5=gostei muito), conforme apresentada no Capítulo III, Figura 3.7.

As fotos codificadas, os dados obtidos pela análise sensorial são apresentados, respectivamente, na Figura D1.1 e Tabela D1.3, do Apêndice D1. A análise de variância é apresentada na Tabela D1.4 do mesmo apêndice.

O cálculo das médias dos valores hedônicos atribuídos a cada imagem da pizza pelos 68 julgadores e índice de aceitação são apresentados na Tabela 4.2.

Para se estruturar a escala, é necessário verificar a posição que cada uma das imagens se situa em relação à avaliação dos julgadores. As médias dos valores hedônicos juntamente com o índice de aceitação dão apenas uma idéia se a imagem estará na zona de rejeição de cor ou na zona de aceitação. Esta escala consiste de três zonas de avaliação, uma zona de aceitação e duas de rejeição, sendo uma para pizzas consideradas muito claras e a outra, para as demasiadamente escuras. O índice de aceitação é calculado dividindo-se a média dos valores por 5 (nível máximo da escala hedônica) e representa o quão próximo da máxima aceitação em relação a cor essa pizza se encontra.

Tabela 4.2 - Cálculo das médias e resultado do teste de Tukey, com nível de significância de 5%, dos dados obtidos para a construção da escala padrão de cor.

<i>Pizzas</i>	<i>n</i>	<i>Média</i> [*]	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Índice de Aceitação (%)</i>
P278	68	2,29 ^a	0,83	45,88
P372	68	4,21	0,87	84,12
P961	68	3,71 ^b	0,99	74,12
P607	68	1,15 ^{c,e}	0,43	22,94
P196	68	3,53 ^b	1,18	70,59
P453	68	1,71 ^d	0,90	34,12
P724	68	3,59 ^b	0,85	71,76
P537	68	2,47 ^a	0,92	49,41
P849	68	1,53 ^{d,e}	0,66	30,59
P110	68	1,00 ^c	0,00	20,00

• Médias com letras iguais não diferem entre si estatisticamente ($p < 0,05$).

Na análise de variância, um valor-p inferior a 5% obtido rejeita a hipótese nula de que todas as médias obtidas para a cor da pizza são iguais. A seqüência das imagens na escala é obtida com auxílio do teste de Tukey, que identificará onde estão essas diferenças, caso existam. Pelo teste de Tukey o valor crítico para a diferença das médias é de 0,46, calculado segundo a Equação (A.26), do Apêndice A, para $\alpha=0,05$, $a=68$ e $gl=670$. A diferença entre cada par de médias foi ocultada na Tabela 4.2 a fim de simplificá-la, são marcadas com a mesma letra, no entanto, aqueles pares que são considerados estatisticamente iguais, ou seja, possuem diferença entre suas médias inferior a 0,46. Embora algumas pizzas não difiram estatisticamente, pelo teste de Tukey, a sua inclusão ou não na escala só pode ser feita após avaliar-se a frequência das notas dadas a cada uma das pizzas, pois, lembrando-se, pode haver pizzas claras demais ou escuras demais que tiveram seus índices de aceitação considerados estatisticamente iguais.

A Tabela 4.3 apresenta esses dados, além da frequência da soma das notas (1) e (2), desgostei muito e desgostei, e da soma das notas (4) e (5), gostei muito e gostei, facilitando, assim, a construção da escala.

Tabela 4.3 – Frequência relativa das notas atribuídas a cada uma das pizzas.

<i>Escala hedônica</i>	<i>Frequência relativa (%)</i>									
	P278	P372	P961	P607	P196	P453	P724	P537	P849	P110
1 (desgostei muito)	11,8	0,0	0,0	88,2	2,9	50,0	2,9	11,8	52,9	100,0
2 (desgostei)	55,9	5,9	14,7	8,8	26,5	38,2	2,9	44,1	44,1	0,0
3 (indiferente)	26,5	11,8	23,5	2,9	5,9	2,9	38,2	32,4	0,0	0,0
4 (gostei)	2,9	38,2	38,2	0,0	44,1	8,8	44,1	8,8	2,9	0,0
5 (gostei muito)	2,9	44,1	23,5	0,0	20,6	0,0	11,8	2,9	0,0	0,0
Soma (4+5)	5,8	82,3	61,7	0,0	64,7	8,8	55,9	11,8	2,9	0,0
Soma (1+2)	67,7	5,9	14,7	97,0	29,4	88,2	5,9	55,9	97,0	100,0

Pela análise das médias dos valores hedônicos atribuídos e teste de Tukey, juntamente com análise da frequência relativa dos valores hedônicos atribuídos a cada imagem e da observação visual dessas imagens, pode-se posicionar as imagens em uma seqüência relativa a avaliação da cor. Com base nesses dados, chegou-se a uma escala composta das pizzas: P453 e P278 (zona de rejeição de pizzas claras), P537, P607, P110 (zona de rejeição das pizzas escuras) e P724, P372, P196 (zona de aceitação), originando a escala apresentada na Figura 4.2. Essa escala será utilizada para avaliar a cor das demais pizzas no decorrer desse trabalho. A Figura 4.3 traz um exemplo de como a escala padrão foi utilizada para a avaliação da cor das pizzas, via correio eletrônico.



Figura 4.2 – Escala padrão de cor utilizada para a avaliação da cor de pizzas.

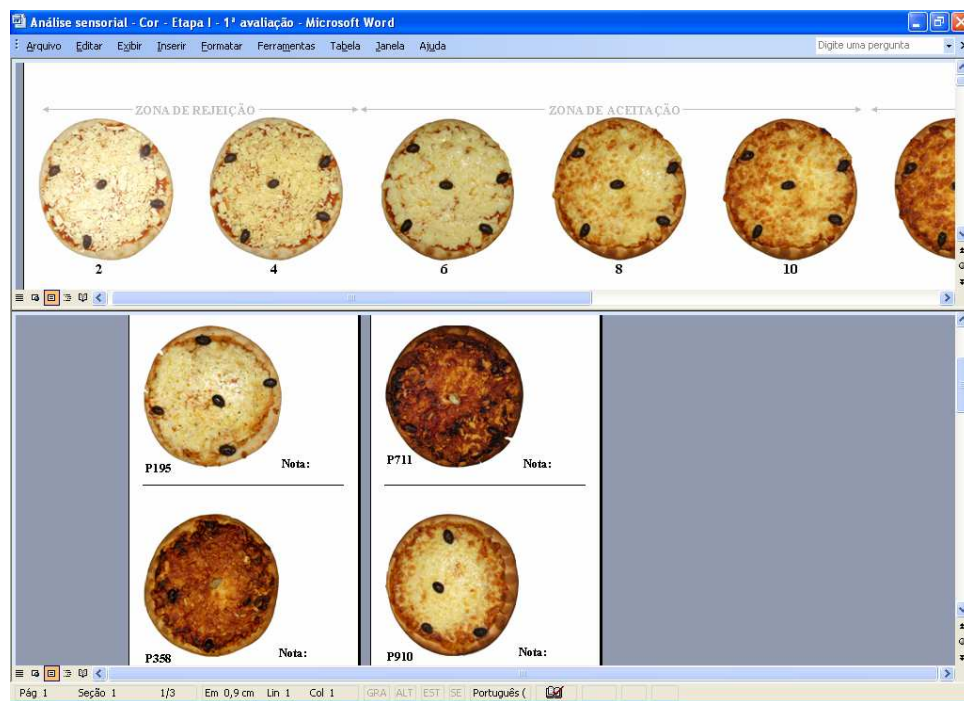


Figura 4.3– Exemplo da utilização da escala padrão para a avaliação da cor das pizzas, via correio eletrônico.

4.2 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE COCÇÃO DA PIZZA

Conforme mencionado no capítulo anterior, duas etapas conduziram a determinação das condições de cocção da pizza: Etapa IA - Estudo sobre a influência da configuração do forno na qualidade da pizza e Etapa IB - Determinação das condições de operação do forno.

4.2.1 Etapa IA – Estudo sobre a influência da configuração do forno na qualidade da pizza

Para a realização desta etapa, o tempo de cocção e a temperatura das paredes foram fixados em 250°C e 10 minutos, respectivamente. A pizza foi colocada no forno após o regime permanente das temperaturas do forno ser alcançado. A temperatura média da pizza, ao entrar no forno, foi de $10,3 \pm 0,8^\circ\text{C}$. O regime permanente foi estabelecido como um ΔT inferior a 3°C , em 25 minutos. Os fatores estudados foram: (A) contribuição da radiação pela superfície superior do forno, (B) contribuição da radiação pelas superfícies laterais do forno, (C) convecção forçada e (D) material da superfície inferior, em contato direto com a pizza. A combinação dos níveis desses fatores é apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Planejamento fatorial completo para o estudo sobre a influência da configuração do forno na qualidade da pizza.

Testes	Combinação dos fatores	Fatores			
		(A) Radiação pelo teto	(B) Radiação pelas paredes	(C) Convecção forçada	(D) Material da forma
T1	(1)	-1	-1	-1	-1
T2	d	-1	-1	-1	1
T3	c	-1	-1	1	-1
T4	cd	-1	-1	1	1
T5	b	-1	1	-1	-1
T6	bd	-1	1	-1	1
T7	bc	-1	1	1	-1
T8	bcd	-1	1	1	1
T9	a	1	-1	-1	-1
T10	ad	1	-1	-1	1
T11	ac	1	-1	1	-1
T12	acd	1	-1	1	1
T13	ab	1	1	-1	-1
T14	abd	1	1	-1	1
T15	abc	1	1	1	-1
T16	abcd	1	1	1	1

São apresentados, no Apêndice D2, os gráficos da temperatura das paredes juntamente com a temperatura da câmara de cocção e da temperatura no interior do produto em função do tempo, bem como, as fotos das pizzas, retiradas em cada uma das condições do forno.

A Tabela 4.5 traz o valor da potência total fornecida pelas resistências elétricas, para as diferentes configurações utilizadas para o forno. Essas potências não foram alteradas quando o ventilador era ligado, sendo, no entanto, maior o tempo necessário para que se atingissem temperaturas próximas aos 250°C.

Tabela 4.5– Potências totais para as diferentes configurações do forno.

Testes	Fatores		Potência (W)
	(A) Radiação pelo teto	(B) Radiação pelas paredes	
T1, T2, T3, T4	-1	-1	688,6
T5, T6, T7, T8	-1	1	741,1
T9, T10, T11, T12	1	-1	726,1
T13, T14, T15, T16	1	1	841,9

As Figura 4.4 a Figura 4.9, extraídas do Apêndice D2, são utilizadas para representar as condições de temperaturas das paredes e da câmara quando se utiliza as formas de alumínio e pedra e quando a convecção forçada é utilizada. Os gráficos para as demais configurações do forno apresentam comportamento semelhante, uma vez que, a temperatura das paredes foi mantida próxima aos 250°C para todos os testes.

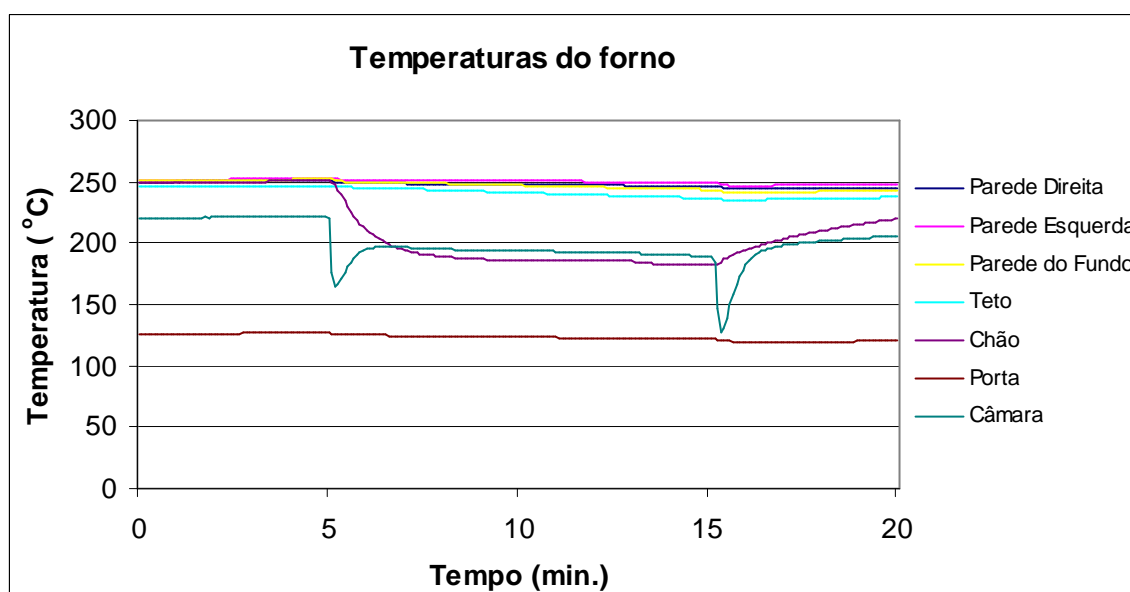


Figura 4.4 – Temperatura do forno, incluindo paredes e câmara, em função do tempo, para o Teste 1.

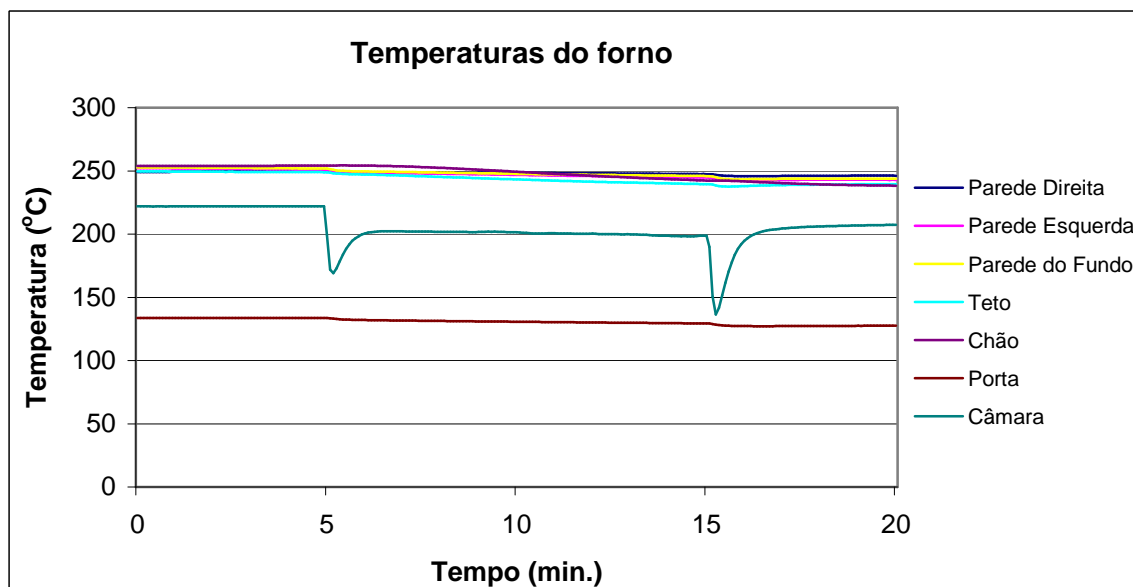


Figura 4.5 – Temperatura do forno, incluindo paredes e câmara, em função do tempo, para o Teste 2.

A Figura 4.4 apresenta a temperatura das paredes e da câmara para o Teste 1, em que todas as superfícies estão recobertas com papel alumínio, bloqueando a radiação, o ventilador está desligado e forma de alumínio está sendo utilizada. No Teste 2, Figura 4.5, as mesmas configurações são utilizadas no forno, porém, a forma utilizada foi a de pedra. Aos 5 e aos 15 minutos o forno foi aberto, para colocar e retirar a pizza, podendo-se notar nesses tempos a queda de temperatura da câmara. O forno é mantido aberto por cerca de 10 segundos para se colocar a pizza. Utilizando-se forma de alumínio, ao se abrir o forno, a temperatura do chão cai bruscamente. Essa queda deve-se à alta difusividade térmica do alumínio que potencializa a transferência de calor do chão para a pizza por condução. A temperatura do chão cai porque a resistência térmica da forma de alumínio é menor que a da forma de pedra. A forma de pedra apresenta alta resistência térmica; a temperatura do chão praticamente não se altera com a abertura do forno. Esse comportamento é notado em todos os testes, inclusive quando o ventilador é utilizado para promover a convecção forçada, conforme ilustram as Figura 4.6 e Figura 4.7.

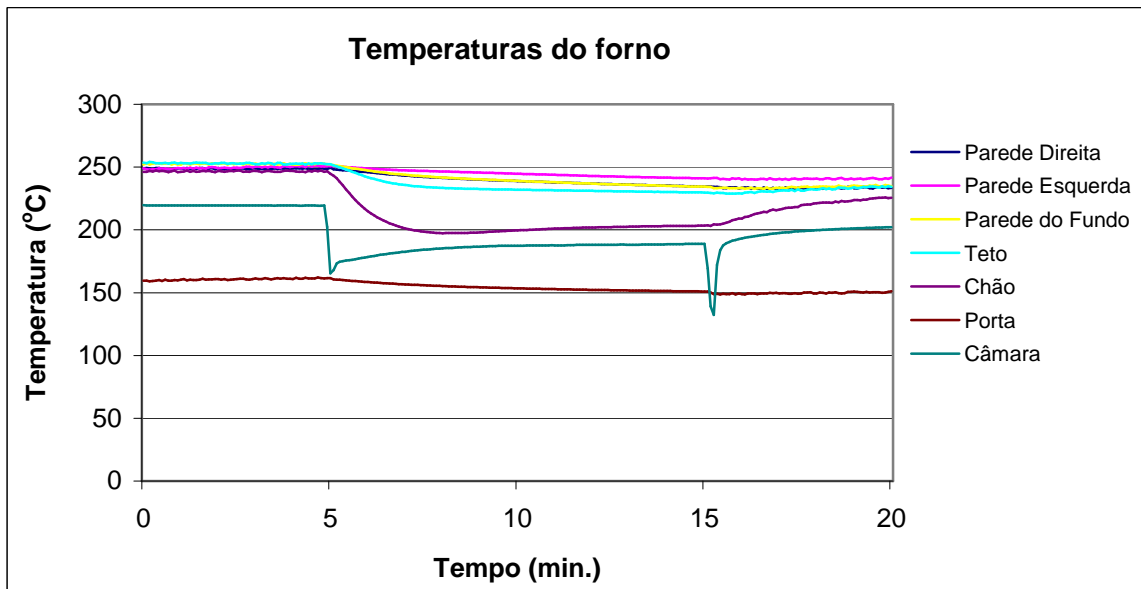


Figura 4.6 – Temperatura do forno, incluindo paredes e câmara, em função do tempo, para o Teste 3.

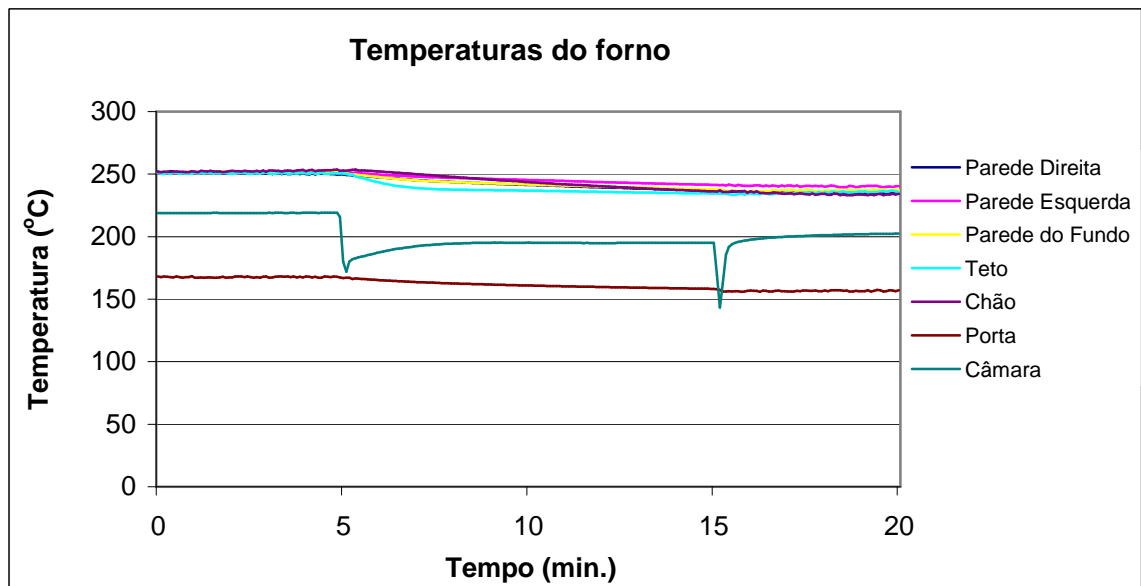


Figura 4.7 – Temperatura do forno, incluindo paredes e câmara, em função do tempo, para o Teste 4.

Nota-se que a temperatura das paredes desses quatro testes, cobertas por papel alumínio, não sofreram uma queda brusca em seus valores. Entre a parede e o papel alumínio forma-se uma massa de ar quente. Essa massa de ar quente fica retida, dificultando a diminuição da temperatura da superfície quando o forno é aberto. Isso pode ser observado nos Testes 5 e 9, apresentados nas Figura 4.8 e Figura 4.9, respectivamente. No Teste 5, não há radiação pelas paredes, porém há pelo teto do forno. Ao se abrir o forno, a temperatura das paredes tende a diminuir menos que a temperatura do teto, não coberto

com papel alumínio. No Teste 9, onde as situações são invertidas; há radiação pelas paredes e não há pelo teto, a temperatura do teto pouco se altera com a abertura do forno.

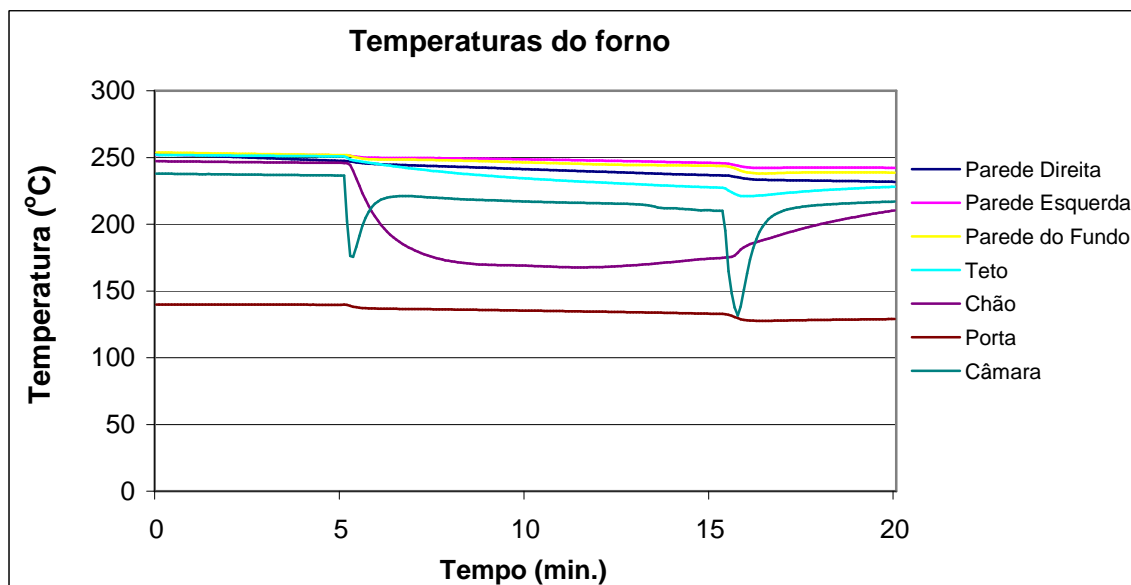


Figura 4.8 – Temperatura do forno, incluindo paredes e câmara, em função do tempo, para o Teste 5.

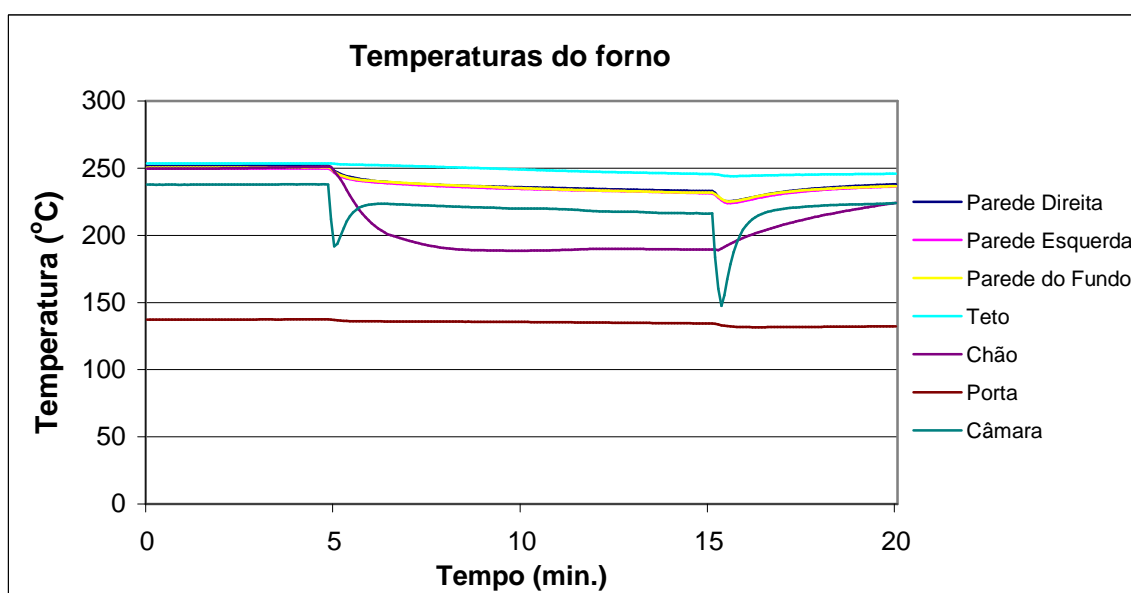


Figura 4.9 – Temperatura do forno, incluindo paredes e câmara, em função do tempo, para o Teste 9.

Os demais testes apresentaram comportamento semelhante, mesmo quando o ventilador foi ligado. Diferenças foram também observadas na temperatura da porta e do ar, uma vez que essas dependiam das temperaturas das demais paredes. A porta foi mantida coberta com papel alumínio em todos os testes, pois não havia resistência elétrica na sua estrutura, como nas outras paredes. Isso fez com que sua temperatura variasse menos durante o teste. Nos testes em que a convecção forçada não foi promovida, a temperatura

da porta ficou entre 125 e 150°C. Nos que se utilizaram convecção forçada, essa temperatura subiu, ficando em torno de 160 a 180°C. Em ambos os testes, com e sem convecção forçada, notou-se maiores temperaturas, tanto da porta quanto do ar, para aqueles testes em que a radiação pelas paredes ou teto estava presente. A temperatura do ar, no entanto, não sofreu grandes variações com relação à convecção forçada.

A avaliação da qualidade sensorial da pizza foi feita conforme descrito no Capítulo III. Os resultados das análises sensoriais para a cor da pizza e a textura da borda, bem como para a perda de água durante o processo de cocção, são apresentados no Apêndice D3.

4.2.1.1 Avaliação da cor

Nesta etapa, a avaliação da cor das pizzas obtidas em cada teste da Tabela 4.4 foi feita por análise sensorial utilizando-se a escala padrão de cor apresentada na Figura 4.2. Esta avaliação foi feita em duplicata, por 10 julgadores selecionados e treinados. Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela D3.1, Apêndice D3. A Tabela 4.6 traz o cálculo das médias para as “n” observações e a análise de variância para os dados da análise sensorial.

As pizzas utilizadas nas réplicas não foram as mesmas, isso pode ocasionar um efeito perturbador sobre a avaliação. Nesse caso, a análise de variância é feita a partir de um planejamento conhecido como *planejamento com blocos completos aleatorizados*, no qual cada réplica do planejamento fatorial completo é considerado um bloco. Neste caso, foram utilizados apenas dois blocos, representando cada um uma das pizzas avaliadas, no qual a resposta de cada tratamento é a média das respostas obtidas dos 10 julgadores.

Em termos práticos, a análise de variância é agora realizada para verificar se há ou não efeito significativo dos fatores envolvidos neste estudo ou de suas interações sobre os atributos de qualidade estudados. Com a análise dos dados experimentais obtidos e o uso de um programa estatístico (MINITAB® 15 STATISTICAL SOFTWARE), a resposta de interesse é automaticamente modelada por um modelo de regressão linear múltipla e os coeficientes deste modelo são obtidos. Pela estatística F da análise de variância, testa-se a hipótese nula de que todos os coeficientes são nulos e, portanto, a sua rejeição é fundamental para que se continue trabalhando com os fatores selecionados.

Uma vez rejeitada a hipótese nula da estatística F da análise de variância, procede-se com a estatística T que fornecerá informações sobre os coeficientes individuais, ou seja, quais dos fatores de entrada estão contribuindo de fato para a cor da pizza. Os coeficientes, erros-padrão dos coeficientes, a estatística do teste T e valores-p para os coeficientes são

apresentados na Tabela D3.2, Apêndice D3. Um procedimento rápido para se verificar o efeito dos fatores e sua magnitude sobre uma determinada resposta é através do gráfico da probabilidade normal para os efeitos padronizados. Os efeitos padronizados são os valores obtidos pelo teste T para cada um dos fatores. Neste gráfico, uma reta passa pela origem do efeito padronizado; os efeitos não significativos tendem a ficar em torno dessa reta, enquanto os significativos afastados dela.

Tabela 4.6– Cálculo das médias e análise de variância para os dados obtidos na análise sensorial para a avaliação da cor da pizza.

<i>Teste</i>	<i>n</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Teste</i>	<i>n</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
<i>T1</i>	20	8,0	0,5	<i>T9</i>	20	7,9	0,4
<i>T2</i>	20	8,0	0,5	<i>T10</i>	20	7,9	0,3
<i>T3</i>	20	15,2	0,4	<i>T11</i>	20	15,3	0,7
<i>T4</i>	20	15,3	0,5	<i>T12</i>	20	15,4	0,5
<i>T5</i>	20	8,0	0,4	<i>T13</i>	20	8,1	0,5
<i>T6</i>	20	8,1	0,6	<i>T14</i>	20	8,0	0,4
<i>T7</i>	20	15,3	0,5	<i>T15</i>	20	15,4	0,5
<i>T8</i>	20	15,4	0,5	<i>T16</i>	20	15,3	0,6

<i>Análise de variância</i>					
<i>Fonte de variação</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Soma Quadrática</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>F₀</i>	<i>Valor-p</i>
Efeito Principal	4	429,99	107,49	25929,2	0,000
Interação de 2ª ordem	6	0,032	0,005	1,28	0,323
Interação de 3ª ordem	4	0,039	0,010	2,34	0,103
Interação de 4ª ordem	1	0,003	0,003	0,68	0,423
Blocos (pizza)	1	0,003	0,003	0,68	0,423
Erro	15	0,062	0,004		
Total	31	430,132			

Pela análise de variância para a cor, apresentado na Tabela 4.6, nota-se que a soma quadrática dos efeitos principais é muito maior que a dos demais fontes de variação. A razão entre a soma quadrática dos efeitos principais e a soma quadrática total é de 0,999, ou seja, esse valor fornece a proporção da variabilidade da resposta que pode ser explicada pelos efeitos principais. Da mesma forma, a média quadrática dos efeitos principais, uma estimativa da variância, ou seja, uma indicação da dispersão dos dados em torno da média, é muito mais expressiva que para os demais; há variabilidade dos dados devido aos efeitos principais. Isso é confirmado pelo valor F_0 , dado pela razão entre a média quadrática do efeito principal e a média quadrática do erro, maior que $F_{crit}=2,68$ e pelo valor-p, inferior ao nível de significância estabelecido ($\alpha=5\%$), Rejeita-se, então, a hipótese nula de que nenhum dos fatores tem efeito significativo sobre a cor; pelo menos um dos fatores,

isoladamente, apresenta influência significativa sobre a cor. As hipóteses nulas para todas as interações dos fatores são aceitas, ou seja, essas interações não têm efeitos significativo sobre a cor.

A verificação dos fatores, cujos efeitos principais são considerados significativos sobre esse atributo pode ser feita pela avaliação dos valores-p do teste T para cada um dos coeficientes, apresentados na Tabela D3.2, Apêndice D3. Essa avaliação, conforme mencionado no Apêndice A, pode ser feita pelo gráfico de probabilidade normal dos efeitos padronizados, apresentado na Figura 4.10. Neste gráfico, em que cada ponto demarcado representa um fator ou interação dos fatores, os efeitos não significativos tendem a localizarem-se em torno de uma reta que passa pela origem do efeito padronizado, enquanto os significativos ficaram afastados desta reta, apresentada em azul no gráfico.

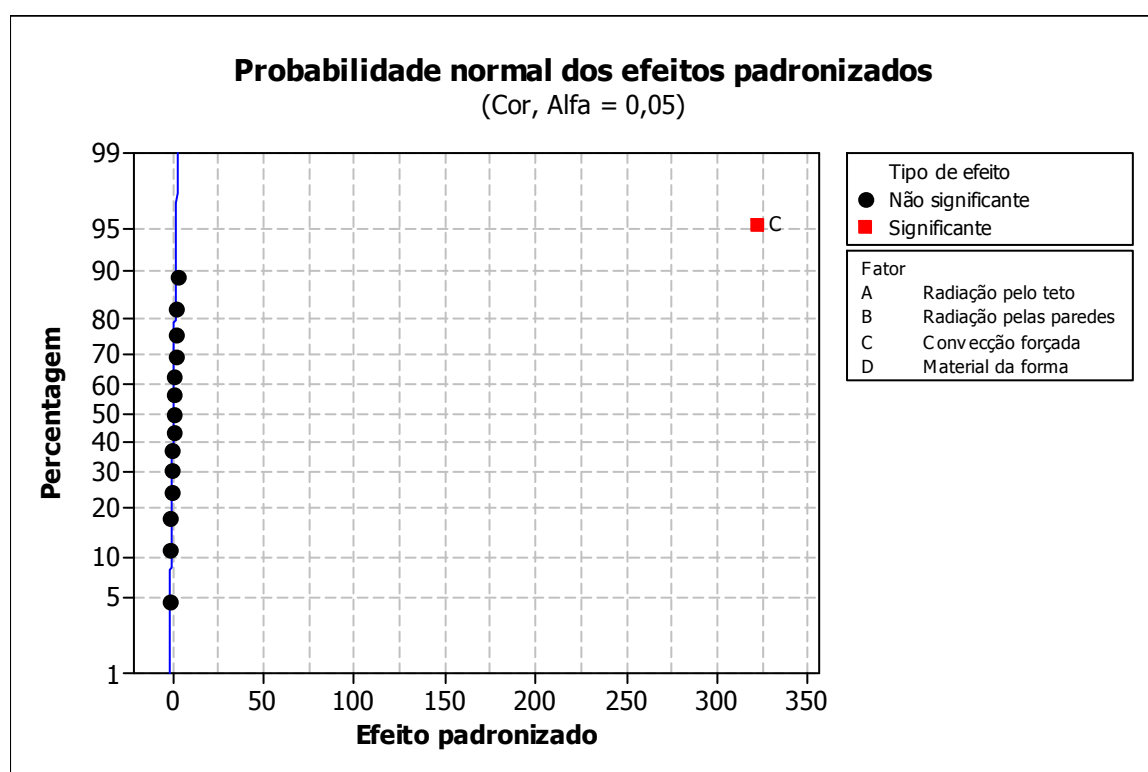


Figura 4.10 – Gráfico da probabilidade normal para os efeitos padronizados para a avaliação da cor da pizza.

Nos gráficos de probabilidade normal para os efeitos padronizados, somente foram destacados aqueles fatores ou interações que tiverem efeito significativo sobre o atributo estudado. Observa-se, então, que a convecção forçada, destacada em vermelho no gráfico e longe da reta que passa pela origem do efeito padronizado, foi o único fator que teve influência significativa sobre a cor.

Um fator influenciar significativamente um determinado parâmetro significa dizer que, ao se variar esse fator do seu nível mais baixo ao seu nível mais alto, provocar-se-á uma mudança significativa no valor desse parâmetro. Essa influência pode ser positiva ou

negativa quando, respectivamente, aumentar ou diminuir o valor do parâmetro. Se positiva, localiza-se à direita da linha contínua do gráfico da probabilidade normal para os efeitos; se negativa, à esquerda.

Conforme é observado na Tabela 4.6, todos os testes em que a convecção forçada esteve presente apresentaram valores médios próximos a 15 para a cor das amostras, situando-as na zona de rejeição da escala apresentada na Figura 4.2, para cocção a 250°C por 10 min. Os testes em que a convecção forçada não foi induzida apresentaram valores médios próximos a 8 para a cor das amostras, estando tais amostras dentro da zona de aceitação da escala. Pela Figura 4.11, observa-se a diferença entre a cor das pizzas assadas sob as mesmas condições de tempo e temperatura do forno, com e sem a indução de convecção forçada.

O aumento da velocidade do ar no interior da câmara promove um aumento da transferência de calor e massa por convecção, assim, a superfície da pizza atinge temperaturas maiores que aquelas atingidas em fornos não-convectivos. A intensidade da reação de *Maillard*, principal reação de escurecimento de produtos de panificação durante a cocção, depende fortemente da temperatura e do conteúdo de umidade do produto. Assim, ligando-se o ventilador no interior do forno, a evaporação será mais intensa, secando a superfície e elevando sua temperatura à temperatura do ar quente no interior do forno, ocasionando intensificação da reação de *Maillard*. Em altas temperaturas e baixa umidade do produto ocorre também a pirólise do amido, resultando em carbono e água, tostando o produto.

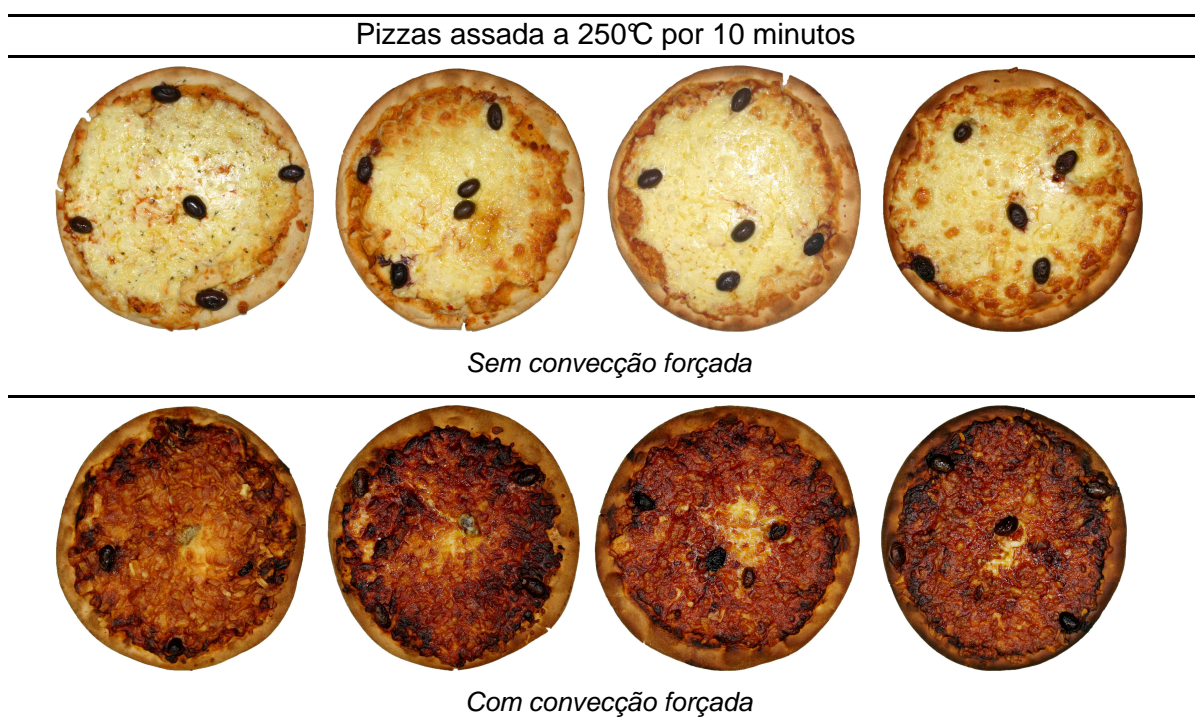


Figura 4.11 – Imagens obtidas de pizzas assadas no protótipo do forno, a 250°C por 10 minutos, sem convecção forçada e com convecção forçada.

4.2.1.2 Textura da borda e perda de água

Para a avaliação da textura da borda, uma análise sensorial foi conduzida para cada teste, realizado em duplicata. A textura da borda de cada uma das pizzas foi avaliada por 25 julgadores. Pedacos da borda foram servidos aos julgadores, juntamente com uma ficha de avaliação sensorial, para o teste de aceitação utilizando-se escala-do-ideal com cinco categorias (1 – muito inferior ao ideal (muito macia) a 5 – muito superior ao ideal (muito dura)), conforme apresentada na Figura 3.10, Capítulo III.

Os resultados dessa análise sensorial são apresentados na Tabela D3.3, Apêndice D3. A Tabela 4.7 traz o cálculo das médias para as *n* observações totais obtidas para cada teste pela análise sensorial.

Tabela 4.7 – Cálculo das médias para os dados obtidos na análise sensorial para a avaliação da textura da borda.

Teste	<i>n</i>	Média	Desvio Padrão	Teste	<i>n</i>	Média	Desvio Padrão
T1	50	2,8	0,8	T9	50	3,3	0,7
T2	50	2,9	0,8	T10	50	3,3	0,6
T3	50	4,0	0,8	T11	50	4,4	0,5
T4	50	4,1	0,7	T12	50	4,4	0,6
T5	50	3,2	0,7	T13	50	3,2	0,5
T6	50	3,3	0,6	T14	50	3,1	0,5
T7	50	4,4	0,6	T15	50	4,3	0,5
T8	50	4,4	0,6	T16	50	4,5	0,5

A análise de variância realizada com os dados da avaliação da textura da borda, apresentada na Tabela D3.4, Apêndice D3, apresentou valores-p inferiores a 5% para os efeitos principais dos fatores e para os efeitos de interação de 2ª ordem entre eles. Pelo menos um dos fatores, isoladamente, e uma das interações entre dois desses fatores, apresentam influência significativa sobre a textura da borda da pizza. A verificação dos fatores, cujos efeitos são considerados significativos sobre a textura da borda, e a magnitude desses efeitos foi feita através do gráfico de probabilidade normal dos efeitos padronizados, apresentado na Figura 4.12. Os efeitos, erros-padrão e valores-p dos fatores são apresentados na Tabela D3.5, Apêndice D.3, para a textura da borda.

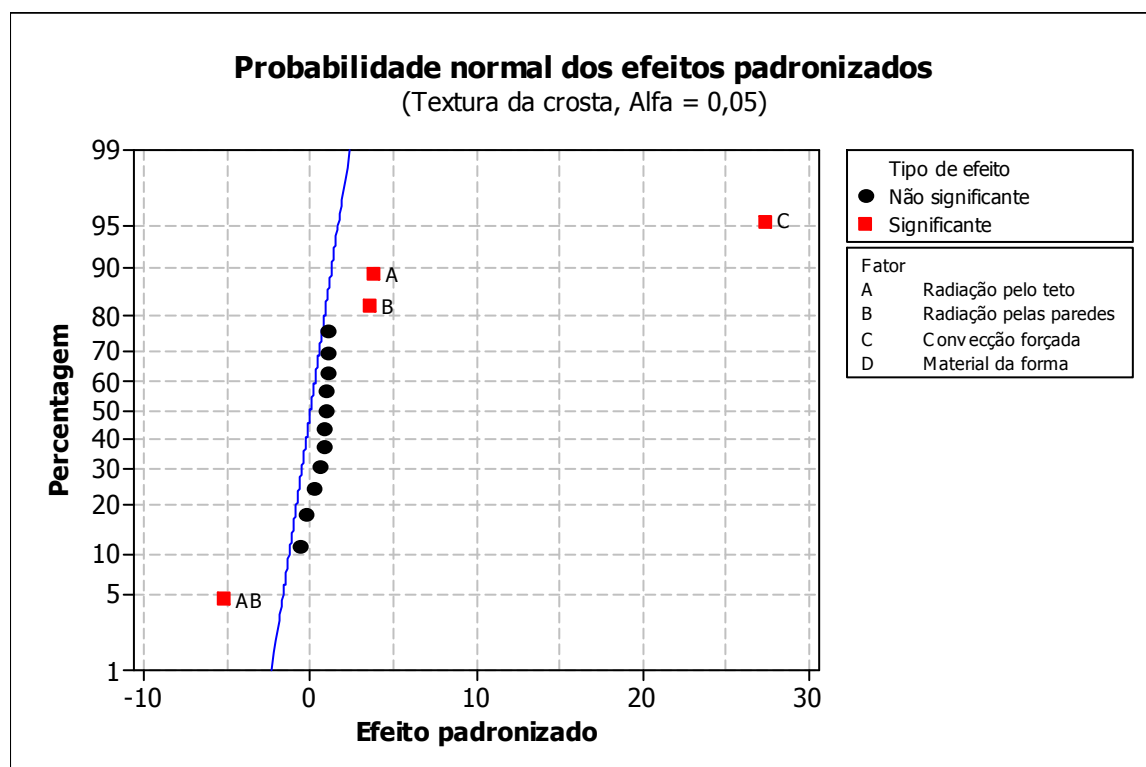


Figura 4.12 – Gráfico da probabilidade normal dos efeitos padronizados para a avaliação da textura da borda.

Pelo gráfico da probabilidade normal dos efeitos padronizados, Figura 4.12, observa-se que os fatores A (radiação pelo teto), B (radiação pelas paredes), C (convecção forçada) e AB (interação entre a radiação pelo teto e radiação pelas paredes) foram os fatores que tiveram efeito significativo sobre a textura da borda, pois seus efeitos localizam-se afastados da linha contínua que passa pela origem (linha azul). Quanto mais distantes desta linha, maior a magnitude do efeito do fator sobre o atributo estudado. Assim, pode-se inferir, pela análise desta figura, que convecção forçada foi o fator de maior efeito sobre a textura da borda da pizza, seguido da interação entre a radiação pelo teto e radiação pelas paredes e dos efeitos isolados radiação pela parte superior e pelas paredes laterais do forno. Os três fatores principais A, B e C apresentam efeito positivo sobre a textura da borda, pois localizam-se a direita da linha contínua azul, enquanto a interação entre a radiação do teto e das paredes laterais tem efeito negativo, pois se apresenta à esquerda desta linha.

Juntamente com a avaliação da textura da borda, foi avaliada a perda de água durante a cocção da pizza. As massas iniciais e finais da pizza, obtidas imediatamente antes e imediatamente depois da cocção, respectivamente, são apresentadas na Tabela D3.6 e a análise de variância desses dados, na Tabela D3.7, do Apêndice D3. A média da porcentagem de água perdida pela pizza durante o processo de cocção é apresentada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Cálculo das médias dos dados obtidos para a avaliação da perda de água pela pizza, durante a cocção.

Teste	n	Média	Desvio Padrão	Teste	n	Média	Desvio Padrão
T1	3	6,6	0,2	T9	3	7,3	0,2
T2	3	7,1	0,2	T10	3	7,4	0,2
T3	3	14,3	0,4	T11	3	14,4	0,2
T4	3	14,2	0,2	T12	3	14,4	0,1
T5	3	7,2	0,2	T13	3	8,2	0,1
T6	3	7,2	0,2	T14	3	7,9	0,2
T7	3	14,6	0,6	T15	3	15,4	0,1
T8	3	14,5	0,1	T16	3	15,3	0,2

A análise de variância realizada com os dados de perda de água durante o processo de cocção apresentou valores-p inferiores a 5% para o efeito principal dos fatores e para os efeitos de interação de 2ª ordem entre eles. O gráfico da probabilidade normal para os efeitos padronizados, Figura 4.13, nos indica quais são esses efeitos significativos.

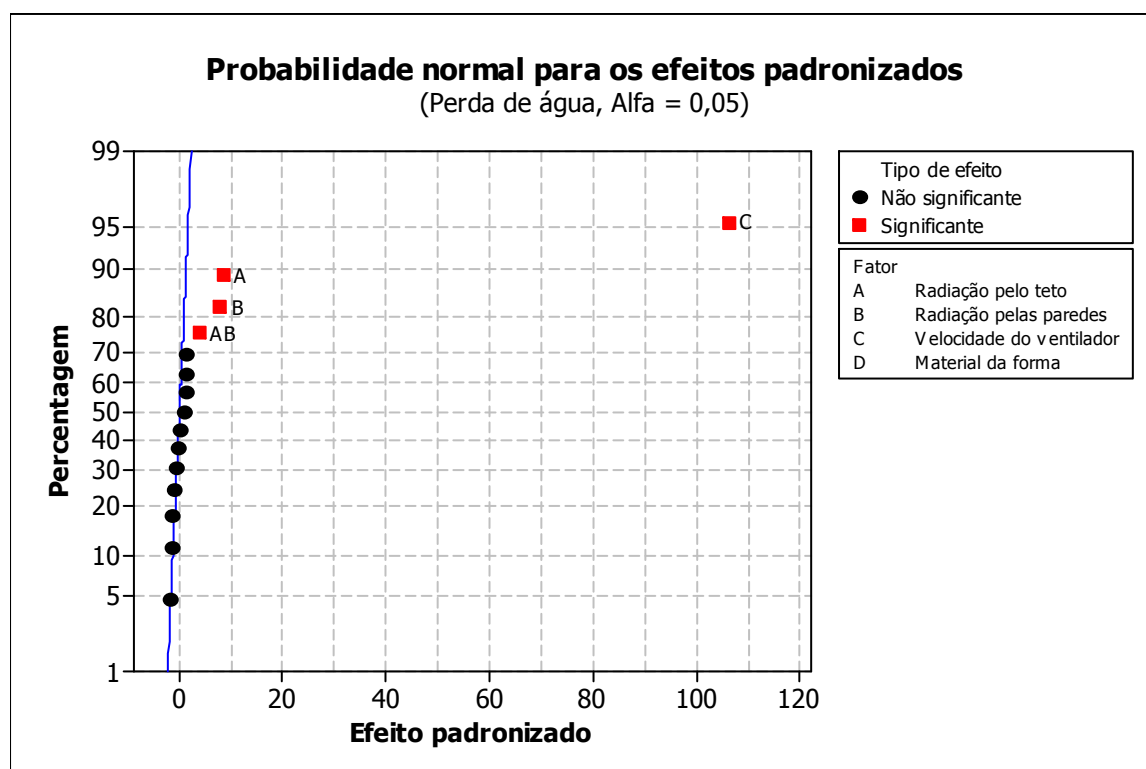


Figura 4.13 – Gráfico da probabilidade normal dos efeitos padronizados para a avaliação da perda de água da pizza.

Para a avaliação da textura da borda e da perda de água durante o processo de cocção concluiu-se, pelas Figura 4.12 e Figura 4.13, que a convecção forçada foi, também, o fator que mais influenciou esse parâmetro. Os efeitos, erros-padrão e valores-p dos

fatores para a perda de água durante a cocção da pizza são apresentados na Tabela D3.6, Apêndice D3. A radiação pelo teto, pelas paredes e a interação entre esses dois fatores também afetaram significativamente a perda de água. No entanto, a magnitude desses efeitos é bem menor que a da convecção.

Tanto para a textura da borda quanto para a perda de água, o efeito da radiação pelo teto (fator A) e pelas paredes (fator B) podem ser considerados iguais. O intervalo de confiança de aproximadamente 95% para o efeito pode ser dado pelo efeito \pm dois erros-padrão do efeito (MONTGOMERY, 2001). Assim, para a textura da borda, o intervalo de confiança para o efeito da radiação pelo teto é (0,0801;0,2549) e para o efeito da radiação pelas paredes é (0,0701; 0,2449). Nota-se que tanto o efeito de A, igual a 0,1675, encontra-se entre o intervalo de confiança para B, quanto o efeito de B, igual a 0,1575, encontra-se entre o intervalo de confiança estabelecido para A. Assim, estatisticamente, a magnitude desses efeitos é igual. Chegou-se a mesma conclusão para o efeito principal desses fatores em relação à perda de água.

O efeito da interação entre a radiação pelo teto e pelas paredes foi também significativo, tanto para a textura da borda quanto para a perda de água durante a cocção. A Figura 4.14 traz o gráfico cúbico para a textura da borda nos dois níveis de convecção forçada. O gráfico cúbico é uma representação estatística em que cada eixo representa um fator estudado, podendo-se, assim, avaliar tanto o efeito principal dos fatores quanto suas interações de segunda ou terceira ordem. Cada extremidade do cubo representa a combinação dos níveis (-1 ou 1) de cada um dos três fatores e traz os valores das médias dessa combinação, para o atributo estudado. Nota-se que a combinação dos níveis baixos da radiação pelo teto e pelas paredes, com ou sem convecção forçada, produz os menores valores para a textura da borda. As demais combinações dos níveis de radiação pelo teto e pelas paredes forneceram valores para textura maiores que os anteriores, para ambos os níveis de convecção forçada, sendo, no entanto, considerados estatisticamente iguais, com 95% de confiança.

Comportamento semelhante foi observado para a perda de água em relação ao efeito de interação entre a radiação pelo teto e pelas paredes. No entanto, houve diferença significativa entre as configurações em que a irradiância provém somente do teto ou somente das paredes e aquela em que a irradiância provém das duas superfícies juntas, para ambos os níveis de convecção forçada, conforme mostra a Figura 4.15.

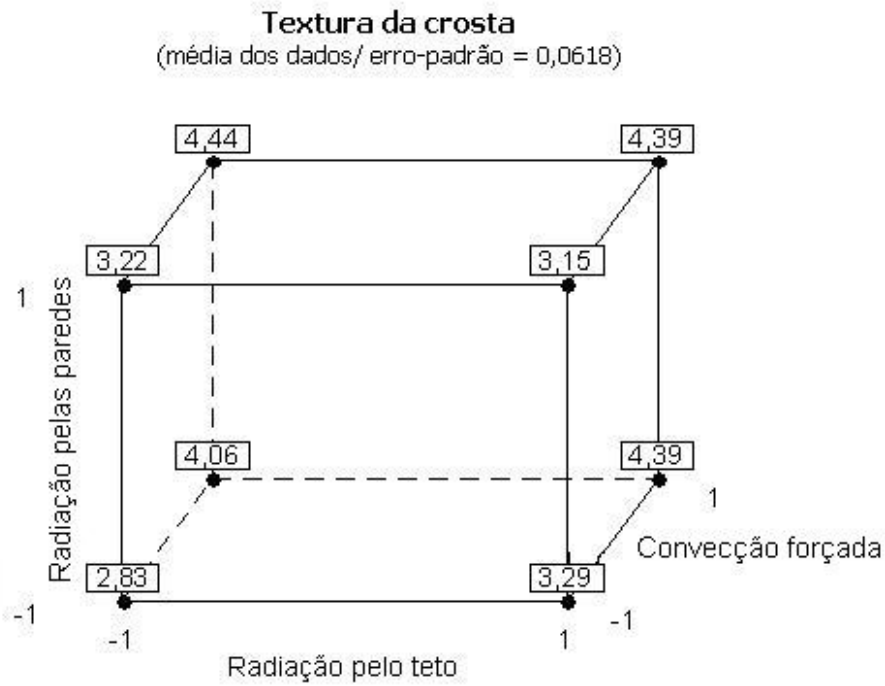


Figura 4.14 – Gráfico cúbico da radiação pelo teto, radiação pelas paredes e convecção forçada, para a textura da borda.

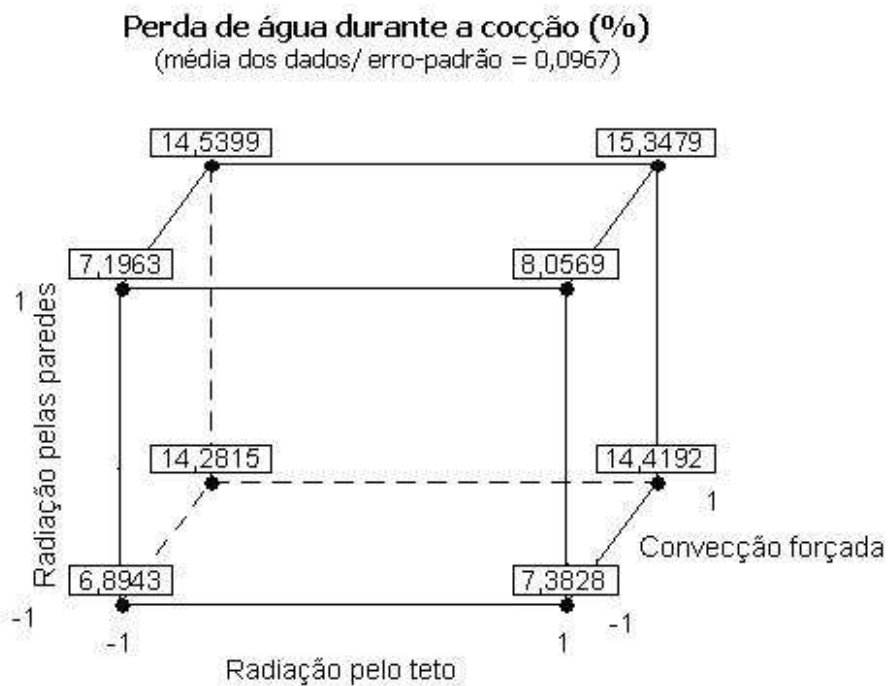


Figura 4.15 – Gráfico cúbico da radiação pelo teto, radiação pelas paredes e convecção forçada, para a perda de água durante a cocção.

Pelas Figura 4.14 e Figura 4.15, percebe-se que os maiores valores para textura e as maiores perdas de água ocorreram quando a convecção forçada foi utilizada. Para a textura da borda, quando a convecção forçada é utilizada, a média dos valores é igual para as configurações nas quais a radiação provém somente do teto e para aquelas em que a radiação provém do teto e paredes laterais ao mesmo tempo. Para a perda de água, independente do nível da convecção forçada, os maiores valores para as médias foram obtidos com o uso da combinação dos níveis mais altos para radiação pelo teto e paredes.

A convecção forçada aumenta a taxa de evaporação de água pela superfície da pizza e, conseqüentemente, a migração da água do interior para a superfície, secando a massa e enrijecendo sua estrutura. Quanto maior a taxa de calor transferido à pizza durante a cocção, maiores foram os valores de textura e perda de água. Esse comportamento pode ser também observado em relação à radiação pelo teto e pelas paredes. Os fatores de forma entre o teto e a pizza e entre as paredes e a pizza são, respectivamente, 0,14 e 0,21. O cálculo desses fatores de forma é apresentado no Apêndice C. Embora a irradiância proveniente das paredes seja 50% maior que aquela proveniente apenas do teto, não houve diferença significativa entre o efeito principal desses fatores, tanto para a textura da borda quanto para a perda de água, conforme visto anteriormente. A irradiância proveniente das duas superfícies juntas, teto e paredes, é aproximadamente 67% maior em relação àquela proveniente apenas das paredes e 150%, em relação à proveniente apenas do teto. Apesar da taxa de transferência de calor por radiação para a pizza ser maior nessa configuração, a textura da borda não se mostrou sensível a essa diferença; a perda de água, no entanto, aumentou com ambas superfícies .

4.2.1.3 Número de reduções decimais e letalidade integral do processo

Durante a cocção de cada uma das pizzas (pizzas assadas em duplicata para cada teste), foi inserido um termopar nas proximidades do centro geométrico da massa, obtendo-se a temperatura em função do tempo, $T_{pizza}(t)$, neste ponto. Para a avaliação do nível de segurança do processo de cocção em relação à destruição de possíveis patógenos, foram calculadas a letalidade integral do processo e o número de reduções decimais por ele causado. A letalidade integral do processo, $F_{processo}$, é obtido pela Equação (3.1) e o número de reduções decimais, γ , de cada processo, pela Equação (2.4):

$$\gamma = \frac{F_{processo}}{D_{Tref}} = \log n_0 - \log n_f$$

onde $T_{ref} = 90^{\circ}\text{C}$ e $D_{Tref} = 3,7 \text{ min.}$ (*Bacillus cereus*).

O valor F_{processo} pode ser entendido como o tempo, em minutos, equivalente ao processamento térmico levado à temperatura constante de referência, nesse caso, 90°C. O número de reduções decimais, razão entre o F_{processo} o valor D para o *Bacillus cereus* à temperatura de referência, por sua vez, pode ser entendido como o quão eficiente foi o processo na destruição microbiana para microrganismos de resistência térmica igual ou inferior a do *Bacillus cereus*.

As planilhas contendo os dados da aquisição de temperatura no interior da massa da pizza são apresentadas no Apêndice D3. Com essas temperaturas foram calculados os índices letais e com os índices letais, o valor F_{processo} e os valores de γ , para cada configuração do forno. A Tabela 4.9 apresenta os valores médios obtidos para F_{processo} , sob as diferentes configurações do forno, bem como, o número de reduções decimais (γ) ocasionado pelo processo, sobre o microrganismo alvo. A Tabela D3.8, Apêndice D3, apresenta a análise de variância para o número de reduções decimais.

Tabela 4.9 – Médias dos F_{processo} e do número de reduções decimais (γ) para o *Bacillus cereus*, a $T_{\text{ref}} = 90^{\circ}\text{C}$.

Teste	N	F_{processo} (min.)	γ	Teste	N	F_{processo} (min.)	γ
T1	2	4,9	1,3	T9	2	6,7	2,1
T2	2	5,9	1,6	T10	2	8,2	2,2
T3	2	73,3	19,8	T11	2	83,7	22,6
T4	2	87,0	23,5	T12	2	86,6	23,4
T5	2	6,4	1,7	T13	2	11,4	3,1
T6	2	7,4	2,0	T14	2	14,4	3,9
T7	2	80,9	21,9	T15	2	87,3	23,6
T8	2	87,8	23,7	T16	2	88,7	24,0

Pela Tabela D3.8, Apêndice D3, pode-se concluir que há somente efeito principal dos fatores estudados sobre o número de reduções decimais ($p < 0,05$). A verificação dos fatores que têm efeito significativo sobre estes parâmetros pode ser feita através do gráfico da probabilidade normal dos efeitos padronizados, Figura 4.16, na qual, os efeitos significativos estão indicados.

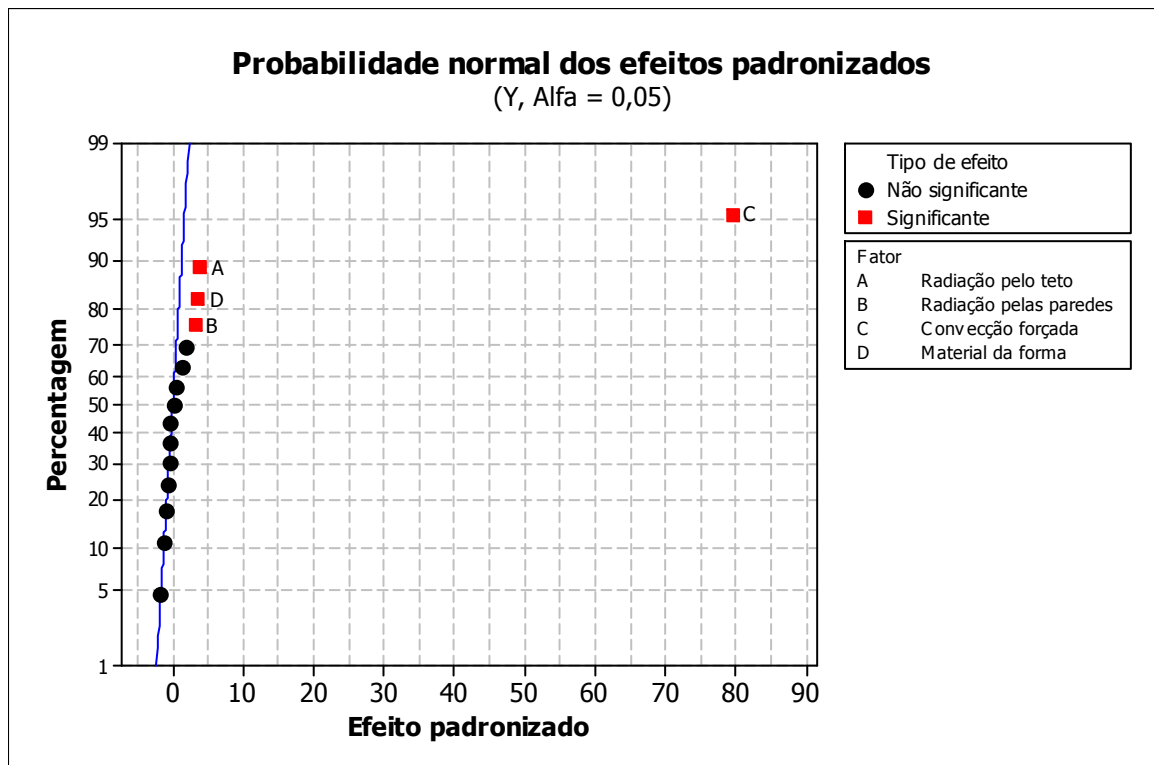


Figura 4.16 – Gráfico da probabilidade dos efeitos padronizados para o número de reduções decimais ocasionados durante a cocção da pizza.

Nota-se que os fatores principais afetaram significativamente os parâmetros F_{processo} e γ . A maior influência foi, mais uma vez, ocasionada pela convecção forçada. Aumentando-se a velocidade do ar no interior do forno, reduz-se a espessura da camada limite térmica, associada à diferença de temperatura entre o fluido e a superfície do alimento, aumentando-se o coeficiente de transferência de calor para o alimento e, assim, a taxa de calor transferida a ele. Dessa forma, as pizzas assadas em fornos convectivos atingiram temperaturas internas mais elevadas que aquelas assadas sem a indução da convecção forçada e, conseqüentemente, obtiveram os valores F_{processo} superiores. A radiação pelas paredes e pelo teto e o material da forma também apresentaram influência significativa e positiva sobre esses parâmetros de segurança. Os efeitos da radiação pelas paredes e pelo teto foram, no entanto, considerados estatisticamente iguais, para um intervalo de confiança de 95% (efeito \pm erros-padrão do efeito). A influência desses fatores sobre o número de reduções decimais pode ser avaliada pelo gráfico cúbico das médias dos dados obtidos para esse parâmetro, apresentado na Figura 4.17.

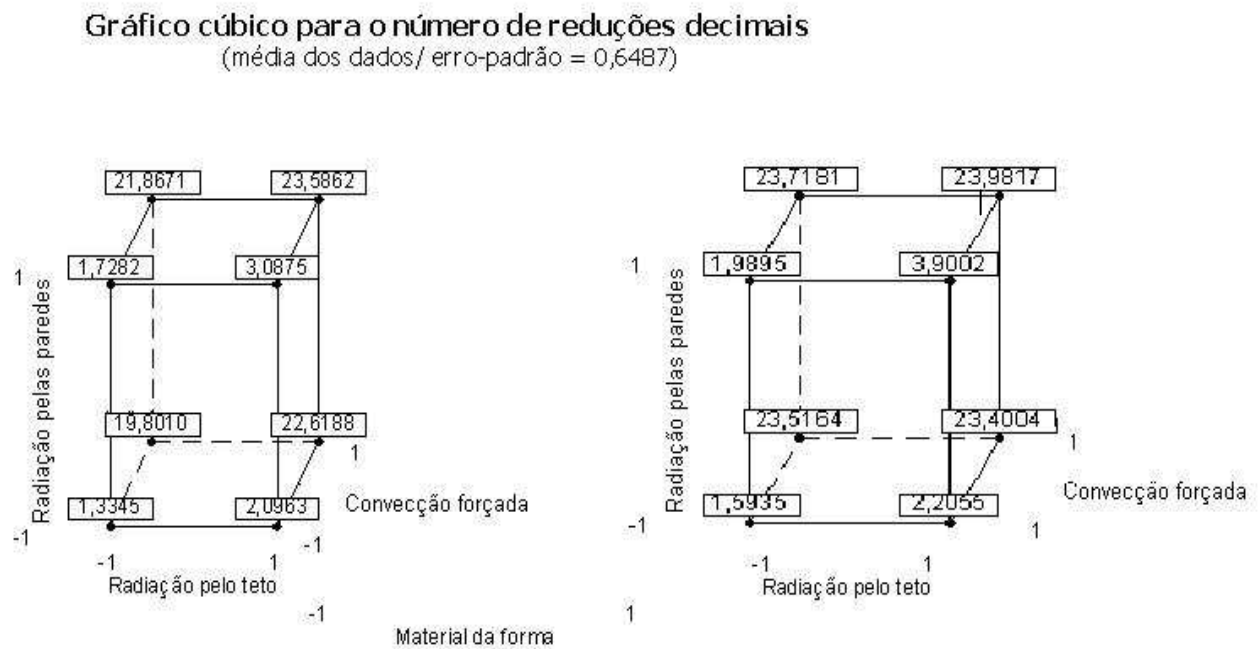


Figura 4.17 – Gráfico cúbico da radiação pelo teto, radiação pelas paredes e convecção forçada, para o número de reduções decimais.

O gráfico cúbico para ambas as formas utilizadas mostra que não houve diferença significativa, com 95% de confiança, entre as configurações cuja radiação proveio somente do teto e cuja radiação proveio somente das paredes laterais, para ambos os níveis utilizados para a forma e para a convecção forçada. No nível baixo da convecção forçada, a configuração cuja radiação é proveniente do teto e das paredes laterais proporcionou maiores números de reduções decimais. Para o nível alto da convecção forçada, não houve diferença estatisticamente significativa para os valores encontrados com a radiação proveniente somente do teto, somente das paredes laterais ou com aquela proveniente das duas superfícies juntas. Os maiores o números de reduções decimais foram proporcionados com o uso da forma de pedra.

O tempo mínimo de tratamento térmico, à temperatura constante de 90°C, necessário para que o produto seja considerado seguro, foi calculado com base em 4 reduções decimais para a concentração de *Bacillus cereus*. A concentração limite desse microrganismo, a partir da qual o alimento é rejeitado pela legislação vigente, é de 10^3 UFC.g⁻¹. Com 4 reduções decimais, considerando-se essa concentração inicial, por exemplo, ter-se-á uma concentração de 0,1UFC.g⁻¹ ao final de 14,8 minutos de processo conduzido a temperatura constante de 90°C. Assim, como uma estimativa do nível de destruição térmica, o valor $F_{T_{ref}}=14,8$ minutos será considerado. O valor $F_{processo}$ deve, então, ser igual ou superior ao $F_{T_{ref}}$ para que o processo seja considerado seguro.

É prudente salientar que esse valor é apenas uma estimativa do nível de destruição térmica que um determinado processo de cocção de pizza deve ter, considerando-se *Bacillus cereus* como microrganismo alvo e $T_{ref} = 90^{\circ}\text{C}$. Na verdade, dificilmente se sabe a carga microbiana de todos os produtos panificáveis, imediatamente antes de seu processamento térmico. Para se assegurar que os produtos de certo estabelecimento encontram-se em conformidade com os padrões microbiológicos estabelecidos, a produção deve ser acompanhada de medidas que previnam a contaminação e proliferação desses microrganismos nos alimentos e de um criterioso controle microbiológico nas etapas precedentes à cocção, o qual deve ser feito por amostragem. Assim, o processamento térmico deve atuar de forma preventiva e não corretiva em relação à segurança microbiológica do produto. Dessa forma, não se deve pensar que um produto que contenha uma carga microbiana alta, por exemplo, 10^7 UFC.g⁻¹ de *Bacillus cereus*, correspondente a uma dose infectante, deverá ser processado até que se enquadre nos limites aceitáveis da legislação vigente. Até porque, na cocção de alimentos, sua qualidade é baseada nos atributos sensoriais, especialmente para os produtos panificáveis.

4.2.1.4 Conclusão

Pelos resultados obtidos para a primeira etapa da determinação das condições de cocção da pizza pode-se verificar que, entre os fatores estudados, a convecção forçada foi o fator de maior influência sobre todos os parâmetros de qualidade avaliados para a pizza. A convecção forçada contribuiu fortemente para o aumento de todos os parâmetros de qualidade avaliados: a cor, avaliada através de uma escala construída propriamente para este fim, teve um aumento 92%. A textura aumentou em 37%, a perda de água, em 98% e o fator de segurança, em 934%, em relação àquelas pizzas assadas sem convecção forçada.

Nem os efeitos principais da radiação pelo teto, pela parede e do material da forma, nem os efeitos de interação desses fatores foram significativos para a cor da pizza, sendo indiferente o nível escolhido para cada um deles. No entanto, para os demais atributos de qualidade avaliados, estes outros fatores foram significantes.

Para a textura da borda e para a perda de água durante a cocção, além da convecção, a radiação pelo teto e pelas paredes tiveram efeito positivo. Pelos gráficos cúbicos, observou-se que, embora haja interação entre a radiação pelo teto e pelas paredes sobre a textura da borda, as configurações utilizando somente radiação pelo teto, somente radiação pelas paredes ou radiação proveniente das duas superfícies juntas não provocaram diferença significativa nos valores de textura, para ambos os níveis de convecção forçada. Para a perda de água, também não houve diferença entre as configurações utilizando radiação somente pelo teto ou somente pelas paredes. No entanto,

utilizando-se com radiação proveniente das duas superfícies, teto e paredes, a perda de água foi maior. Alguns autores (THERDTHAI; ZHOU; ADAMCZAK, 2002), em seus estudos com produtos de panificação, avaliaram diferentes processos de cocção, priorizando em sua escolha, aquele que conduziu à menor perda de água pelo produto.

Para o parâmetro de segurança microbiológica avaliado – o número de reduções decimais, todos os fatores apresentaram efeito positivo. O fator de maior influência sobre esse parâmetro foi também a convecção forçada. O uso da forma de pedra proporcionou um aumento de 8% no número de reduções decimais, quando comparado ao uso da forma de alumínio. Com a combinação de convecção forçada e forma de pedra, não houve diferença significativa entre as configurações utilizando radiação proveniente somente do teto, somente das paredes laterais ou de ambas superfícies. Pelo gráfico cúbico para o número de reduções decimais, nota-se que as pizzas assadas em forno a 250°C, por 10 minutos, sem convecção forçada, para todas as combinações dos demais fatores, não atingiram nem 4 reduções decimais, número mínimo estipulado nesse estudo.

Determinados os principais fatores que influenciam a resposta, deve-se definir uma região de investigação para cada um dos fatores. Quando o nível de um fator é qualitativo, não havendo interação com outro fator cujo nível é quantitativo, pode-se fixá-lo de com base no comportamento do fator e em outros critérios que justifiquem a escolha desse nível.

Assim, diante das observações expostas, a configuração do forno adotada será: convecção forçada, sendo que outros níveis para esse fator serão investigados; radiação pelo teto e paredes e utilização de forma de pedra. Embora a radiação seja pelo teto e pelas paredes laterais, somente a resistência do teto será ligada, sendo as paredes laterais aquecidas pelo calor fornecido ao forno pelas superfícies superior e inferior.

4.2.2 Etapa IB – Determinação das condições de operação do forno

Sob a configuração escolhida na Etapa IA, foram investigados três níveis de temperatura (150, 250 e 350°C), três níveis de tempo (3, 5, 10 minutos) e três níveis para a frequência do ventilador (5, 20, 35 Hz). A combinação dos fatores de cada teste é apresentada na

Tabela 4.10. Cada teste é enumerado conforme a combinação dos níveis de temperatura, velocidade do ventilador e tempo, nesta ordem.

O mesmo procedimento utilizado na Etapa IA para avaliar a qualidade das pizzas, foi aqui utilizado: avaliação da cor, textura, perda de água e número de reduções decimais.

Tabela 4.10 – Combinação dos fatores estudados na Etapa IB.

<i>Temperatura</i>	<i>Tempo de cocção</i>			<i>Freqüência do ventilador</i>
	3 min.	5 min.	10 min.	
150°C	Teste 111	Teste 112	Teste 113	5Hz
	Teste 121	Teste 122	Teste 123	20Hz
	Teste 131	Teste 132	Teste 133	35Hz
250°C	Teste 211	Teste 212	Teste 213	5Hz
	Teste 221	Teste 222	Teste 223	20Hz
	Teste 231	Teste 232	Teste 233	35Hz
350°C	Teste 311	Teste 312	Teste 313	5Hz
	Teste 321	Teste 322	Teste 323	20Hz
	Teste 331	Teste 332	Teste 333	35Hz

A princípio seria seguido um planejamento experimental completo 3^3 , totalizando 27 testes. No entanto, verificou-se que assando uma pizza no forno a 350°C por 5 minutos, com freqüência do ventilador igual a 5Hz, a cor da pizza já se encontrava acima do limite superior de aceitação da escala de cor padrão. O Apêndice D4 traz os dados obtidos para essa segunda etapa: as imagens obtidas para cada um dos testes, os dados de aquisição de temperatura no interior de cada pizza, com os quais foram calculadas as letalidades integrais de cada processo e os números de reduções decimais associados a eles, para os processos de cocção de 3, 5 e 10 minutos, respectivamente, bem como, os dados das análises sensoriais feitas para a obtenção da cor da pizza e da textura da borda. A tabela abaixo traz a média dos valores obtidos para os atributos de qualidade sensorial e de segurança, bem como, para o número de reduções decimais e para a perda de água ocasionada pelo processo de cocção.

Tabela 4.11 – Média dos valores obtidos para a cor, textura da borda, número de reduções decimais e perda de água ocasionada pelo processo de cocção.

<i>Teste</i>	<i>Reduções decimais</i>	<i>Cor</i>	<i>Textura da borda (*)</i>	<i>Perda de água (%)</i>	
<i>Teste 111</i>	0,0	2,1	1,5	0	1,0
<i>Teste 112</i>	0,0	2,2	1,7	0	1,5
<i>Teste 113</i>	0,0	3,9	2,2	24	2,8
<i>Teste 121</i>	0,0	3,8	2,0	16	2,0
<i>Teste 122</i>	0,0	4,0	2,4	48	3,1
<i>Teste 123</i>	0,0	6,2	2,7	68	4,3
<i>Teste 131</i>	0,0	4,3	2,1	28	2,9
<i>Teste 132</i>	0,0	4,5	2,6	56	4,3
<i>Teste 133</i>	0,5	7,6	2,8	76	5,9
<i>Teste 211</i>	0,0	4,0	2,1	24	3,2
<i>Teste 212</i>	0,1	6,2	2,8	68	3,6
<i>Teste 213</i>	6,1	7,7	3,0	60	6,6
<i>Teste 221</i>	0,0	6,3	2,9	84	4,0
<i>Teste 222</i>	4,9	8,2	3,1	84	6,1
<i>Teste 223</i>	12,0	13,6	4,3	12	10,3
<i>Teste 231</i>	0,0	7,6	3,2	64	6,9
<i>Teste 232</i>	4,4	12,5	3,9	32	9,5
<i>Teste 233</i>	21,8	14,3	4,6	0	12,3
<i>Teste 311</i>	0,0	12,4	4,3	0	7,6
<i>Teste 312</i>	0,4	13,5	4,5	0	9,9
<i>Teste 313</i>	17,1	16,0	4,9	0	12,8
<i>Teste 321</i>	0,4	14,4	4,4	8	9,6
<i>Teste 322</i>	6,7	16,0	5,0	0	13,2

(*) Para este atributo serão apresentadas as médias dos valores atribuídos pelos julgadores e a frequência de respostas “ideal”, em %.

Para a escolha das melhores condições de operação do forno serão adotados os seguintes critérios, nesta ordem: as condições que ocasionarem número de reduções decimais superior a 4, cor da pizza compreendida entre 6-10 (zona de aceitação), frequência de “ideais” superior a 50% para a textura da borda e menor perda de água durante o processo de cocção.

4.2.2.1 Conclusão

Pela Tabela 4.11, nota-se que, dentre as condições de operação do forno avaliadas, somente duas atenderam aos critérios estabelecidos: aquelas assadas em forno a 250°C, com ventilador operando com uma frequência de 5Hz, durante 10 minutos (Teste 213) e aquelas assadas em forno a 250°C, com ventilador a 20Hz, durante 5 minutos (Teste 222).

Por conveniência e economia, será adotada a condição de operação com menor tempo de cocção para a caracterização das condições térmicas do processo de cocção da pizza, ou seja, temperatura das superfícies de 250°C, ventilador 20Hz, durante 5 minutos (Teste 222).

4.3 QUANTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

As quantificação dos mecanismos de transferência de calor envolvidos durante a cocção da pizza foi feita pelo método da capacitância global, utilizando-se a técnica dos blocos, descrita no Capítulo III. A validade deste método foi, entretanto, primeiramente avaliada.

4.3.1 Validade do método da capacitância global

A validade do método da capacitância global está condicionada à hipótese assumida de que o bloco de alumínio é isotérmico, ou seja, de que a temperatura no sólido é espacialmente uniforme em qualquer instante do processo transiente.

Conforme descrito no item 3.5.1.1, Capítulo III, foram necessários, no total, três ensaios para que os dados referentes a um planejamento fatorial fracionado 2_{IV}^{4-1} (planejamento de resolução IV) fossem obtidos com a combinação dos fatores Θ_B , R_B , Θ_F e x_F , respectivamente, ângulo e raio do bloco e ângulo e raio do forno. Em cada ensaio, o bloco de alumínio foi colocado no forno pré-aquecido nas condições determinadas anteriormente e as temperaturas de quatro termopares inseridos no bloco foram registradas. Os fatores Θ_B e R_B são dados pela posição do termopar no interior do bloco de alumínio, enquanto que, os fatores Θ_F e R_F , pela posição deste bloco dentro do forno. A Tabela 4.12 traz a combinação desses fatores.

Tabela 4.12 – Combinação dos fatores R_B , Θ_B , R_F e Θ_F para o planejamento fatorial fracionado 2_{IV}^{4-1} e posição do bloco e do termopar correspondentes.

Combinação	Posição do bloco	Posição do termopar	Fatores			
			(A) R_B	(B) Θ_B	(C) R_F	(D) Θ_F
1	1	2	-	-	-	+
2	3	1	+	-	-	-
3	1	3	-	+	-	-
4	2	4	+	+	-	+
5	2	2	-	-	+	-
6	1	1	+	-	+	+
7	3	3	-	+	+	+
8	1	4	+	+	+	-

Para cada combinação do planejamento 2_{IV}^{4-1} , utilizando a relação de definição I=ABCD, foi traçada uma curva de temperatura em função do tempo. Essas curvas são apresentadas na Figura 4.18. Na legenda dessa figura, Pb e Pt referem-se à posição do bloco e à posição do termopar, segundo a Figura 3.16, apresentada no Capítulo III.

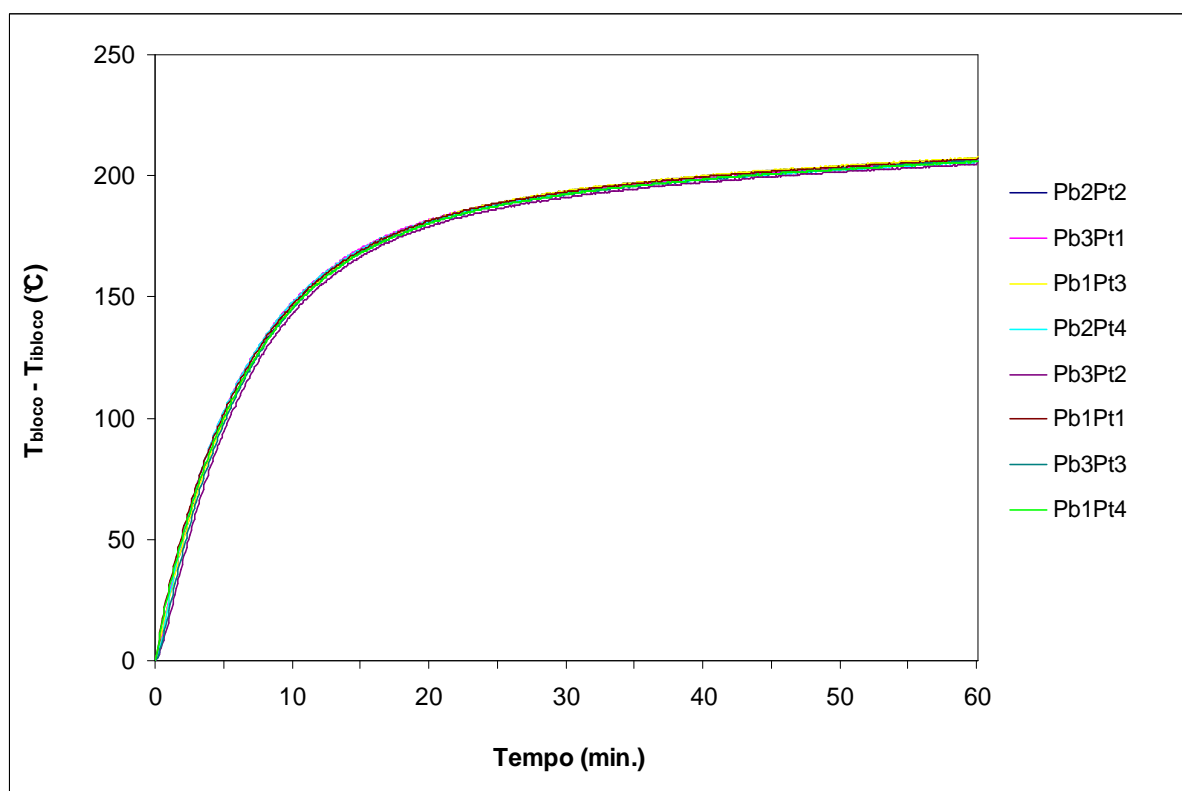


Figura 4.18 – Curvas de temperatura em função do tempo para diferentes posições do bloco dentro do forno e diferentes posições do termopar dentro do bloco de alumínio.

A hipótese de que todas as curvas podem ser consideradas iguais e, conseqüentemente, o bloco considerado isotérmico, foi avaliada com base em três respostas:

1. $H_{0(1)}: T_{i1} = T_{i2} = \dots = T_{ij}$, onde $i = 1..6$ corresponde aos tempos em que as temperaturas foram obtidas, sendo $t_1=5$, $t_2=10$, $t_3=15$, $t_4=30$, $t_5=45$ e $t_6=60$ minutos, e $j = 1..n$ corresponde às combinações apresentadas na tabela acima. Na Tabela 4.13, são apresentados os conjuntos das temperaturas, nesses tempos, para cada uma das combinações.

Tabela 4.13 – Temperaturas em diferentes tempos para as curvas da Figura 4.18.

Combinação	Temperaturas (°C)					
	$t=5min.$	$t=10min.$	$t=15min.$	$t=30min.$	$t=45min.$	$t=60min.$
1	99,91	146,05	169,07	193,46	202,15	207,33
2	102,82	147,78	170,09	192,97	201,27	206,55
3	99,36	145,67	169,03	193,61	202,32	207,58
4	102,67	147,61	169,56	192,64	200,65	206,64
5	94,73	142,97	166,67	191,04	199,66	206,00
6	101,82	146,93	169,42	193,27	201,76	206,97
7	97,85	145,14	168,13	192,20	200,85	206,20
8	100,30	145,45	168,14	192,43	200,65	206,07

Uma análise de variância foi conduzida, para cada uma das temperaturas, para verificar se a hipótese nula é verdadeira (Apêndice E, Tabela E.1). Os valores p, obtidos dessa análise para um nível de significância de 5%, e os coeficientes de determinação do modelo, R^2 , são apresentados abaixo:

Tabela 4.14 – Análise de variância para os dados da Tabela 4.13.

Fonte	Valor-p ($\alpha=5\%$)					
	$t=5min.$	$t=10min.$	$t=15min.$	$t=30min.$	$t=45min.$	$t=60min.$
(A) R_B	0,092	0,098	0,110	0,301	0,446	0,556
(B) Θ_B	0,764	0,925	0,694	0,821	0,615	0,790
(C) R_F	0,143	0,118	0,088	0,086	0,099	0,222
(D) Θ_F	0,272	0,197	0,206	0,206	0,221	0,535
AB	0,316	0,221	0,145	0,129	0,111	0,441
AC	0,386	0,705	0,352	0,082	0,077	0,247
R^2	98,72	98,87	99,13	99,34	99,34	94,33

2. $H_{0(2)}$: $c_{11} = c_{12} = \dots = c_{ij}$, onde c_{ij} são os coeficientes do polinômio de 5º grau ajustado a cada uma das curvas; l corresponde aos coeficientes do polinômio de 5º grau, ajustado às curvas e $j = 1..n$ corresponde às combinações apresentadas na tabela acima. Na Tabela 4.15, são apresentados os conjuntos dos coeficientes para cada uma das combinações.

Tabela 4.15 – Coeficientes do polinômio de 5º grau para as curvas da Figura 4.18.

Combinação (j)	Coeficientes (c_{ij})				
	$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$	$l=5$
1	1,30E-11	-2,86E-08	2,42E-05	-1,00E-02	2,12
2	1,44E-11	-3,14E-08	2,63E-05	-1,07E-02	2,20
3	1,27E-11	-2,80E-08	2,39E-05	-9,93E-03	2,11
4	1,45E-11	-3,15E-08	2,64E-05	-1,07E-02	2,19
5	9,79E-12	-2,25E-08	2,01E-05	-8,84E-03	1,99
6	1,47E-11	-3,19E-08	2,65E-05	-1,07E-02	2,19
7	1,16E-11	-2,60E-08	2,26E-05	-9,58E-03	2,07
8	1,39E-11	-3,02E-08	2,53E-05	-1,03E-02	2,14

Uma análise de variância foi conduzida, para cada um dos coeficientes, para verificar se a hipótese nula é verdadeira (Apêndice E, Tabela E.2). Os valores-p, obtidos dessa análise para um nível de significância de 5%, e os $R^2_{ajustado}$ do modelo são apresentados abaixo:

Tabela 4.16 – Valores-p da análise de variância para os dados da Tabela 4.15.

Fonte	Valor-p ($\alpha=5\%$)				
	C1	C2	C3	C4	C5
(A) R_B	0,074	0,073	0,069	0,064	0,074
(B) Θ_B	0,624	0,672	0,597	0,629	0,874
(C) R_F	0,163	0,161	0,149	0,135	0,136
(D) Θ_F	0,042	0,237	0,223	0,208	0,234
AB	0,319	0,301	0,272	0,233	0,234
AC	0,187	0,194	0,205	0,225	0,272
R^2	99,09	99,1	99,19	99,30	99,13

3. $H_{0(3)}$: $A_1 = A_2 = \dots = A_j$, onde A_j são as áreas abaixo das curvas do polinômio, $j=1..n$ corresponde às combinações apresentadas na tabela acima. Na Tabela 4.17, é apresentada a área abaixo de cada curva.

Tabela 4.17 – Área abaixo das curvas da Figura 4.18.

<i>Combinação</i>	A_j
1	3170,1
2	3270,0
3	3156,2
4	3252,3
5	3007,2
6	3252,6
7	3105,5
8	3187,8

Uma análise de variância foi conduzida para as áreas para verificar se a hipótese nula é verdadeira (Apêndice E, Tabela E.3). Os valores p, obtidos dessa análise para um nível de significância de 5%, e os coeficientes de determinação do modelo, R^2 , são apresentados abaixo:

Tabela 4.18 – Análise de variância para os dados da Tabela 4.17.

<i>Fonte</i>	<i>Valor p ($\alpha=5\%$)</i>
	<i>Área</i>
(A) R_B	0,079
(B) Θ_B	0,981
(C) R_F	0,138
(D) Θ_F	0,247
AB	0,236
AC	0,292
R^2	99,03

4.3.1.1 Conclusão

As análises de variância realizadas para verificar a veracidade das três hipóteses avaliadas apresentaram níveis descritivos, valor-p, acima de 5% (nível de significância escolhido) para todos os fatores estudados, aceitando-se, assim, a hipótese de ser o bloco de alumínio isotérmico.

4.3.2 Medida experimental dos coeficientes de transferência de calor

Uma vez confirmada a hipótese de ser o bloco de alumínio isotérmico e utilizando-se o forno sob as configurações e condições de operação estabelecidas nas etapas anteriores, procedeu-se com os testes para a determinação das condições térmicas de cocção da pizza. O bloco foi colocado no forno previamente aquecido e foi mantido nele até que sua temperatura atingisse o regime permanente. A Figura 4.19 apresenta imagens dos blocos utilizados nos seguintes testes:

Bloco Preto – Aquecimento do bloco de alumínio recoberto com negro de fumo ($\epsilon=0,95-0,98$, segundo Siegel e Howell, 1992), cuja emissividade, para os cálculos, foi considerada igual a 1;

Bloco Polido – aquecimento do bloco de alumínio recoberto com folha de alumínio ($\epsilon=0,07$ a 27°C , segundo Incropera e Dewitt, 1998), cuja emissividade foi considerada igual a 0;

Bloco Polido + isolante – aquecimento do bloco de alumínio recoberto com folha de alumínio e sobre uma camada de aproximadamente 1 cm de espessura de isolante térmico ($k=0,038\text{ W/mK}$, segundo Incropera e Dewitt, 1998).



Figura 4.19 – Imagens dos blocos utilizados nos testes para determinação dos coeficientes de transferência de calor.

As Figura 4.20 e Figura 4.21 apresentam os gráficos da evolução da temperatura no interior do bloco de alumínio durante os testes, para as duas réplicas do teste, respectivamente.

Embora a maioria das equações que aparecerão na sequência desta etapa já tenha sido apresentada no Capítulo III, subitem 3.5, serão aqui repetidas para o melhor entendimento dos procedimentos adotados à obtenção dos resultados.

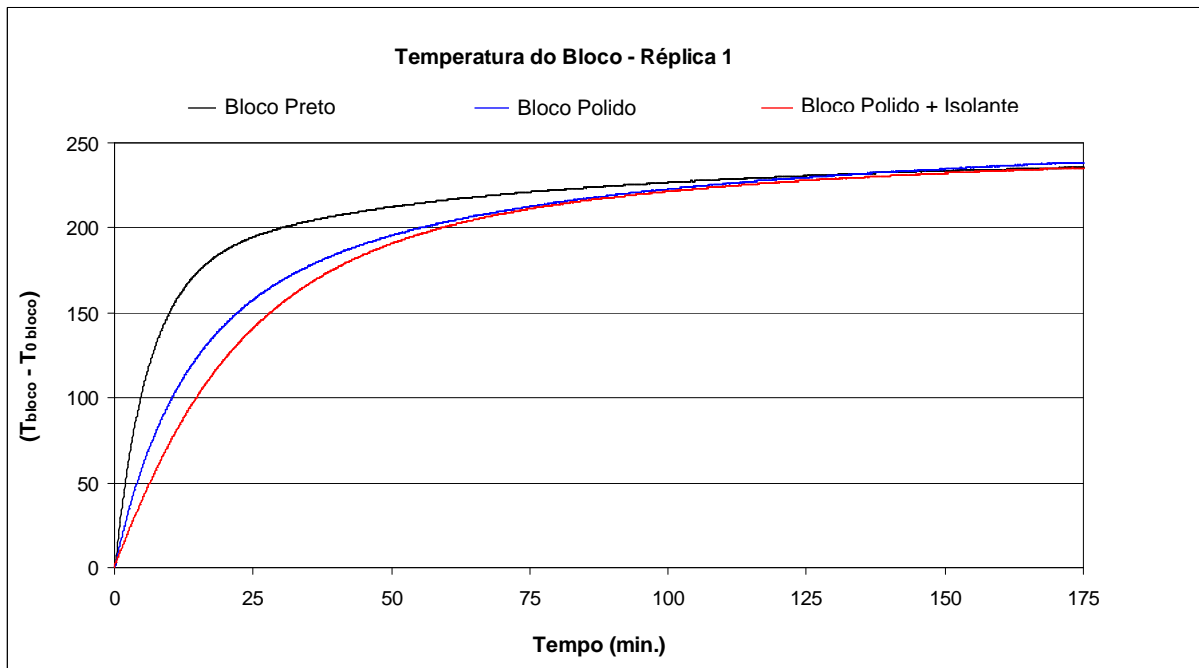


Figura 4.20 – Gráfico da temperatura em função do tempo para os blocos preto, polido e polido mais material isolante. Réplica 1.

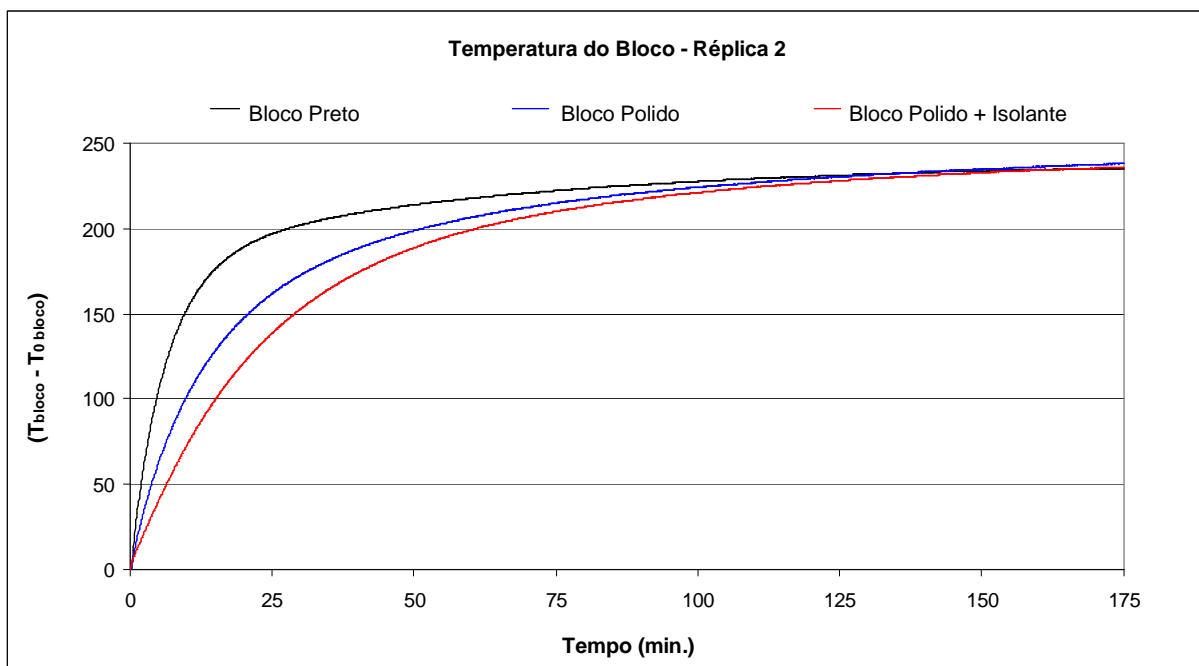


Figura 4.21 – Gráfico da temperatura em função do tempo para os blocos preto, polido e polido mais material isolante. Réplica 2.

Nota-se que no teste com bloco polido sobre o material isolante, a transferência de calor dá-se apenas por convecção, uma vez que a superfície inferior do bloco encontra-se termicamente isolada da base do forno e o papel alumínio impede a transferência de calor por radiação.

Deste teste pode-se calcular, pela Equação (4.1), o coeficiente convectivo de transferência de calor, h_{conv} .

$$\frac{T - T_{ar}}{T_0 - T_{ar}} = \exp \left[- \left(\frac{h_{conv} A_{bloco}}{m c_p} \right) t \right] \quad (4.1)$$

O h_{conv} pode, então, ser determinado traçando-se a curva de $\ln \left(\left(\frac{T_{bloco} - T_{ar}}{T_0 - T_{ar}} \right) \right) \times t$.

Pela inclinação da reta obtida, tem-se, por comparação, que:

$$\tau = \frac{-h_{conv} A_{bloco}}{m c_p}, \quad (4.2)$$

onde τ é a inclinação da reta obtida, m é a massa do bloco, c_p é o calor específico à pressão constante e A_{bloco} é a área superficial do bloco.

A Figura 4.22 mostra as temperaturas do bloco e do forno e as curvas logarítmicas das temperaturas adimensionais em função do tempo, para ambas as réplicas. As temperaturas adimensionais foram apresentadas até os 10 minutos (600s) de aquecimento do bloco.

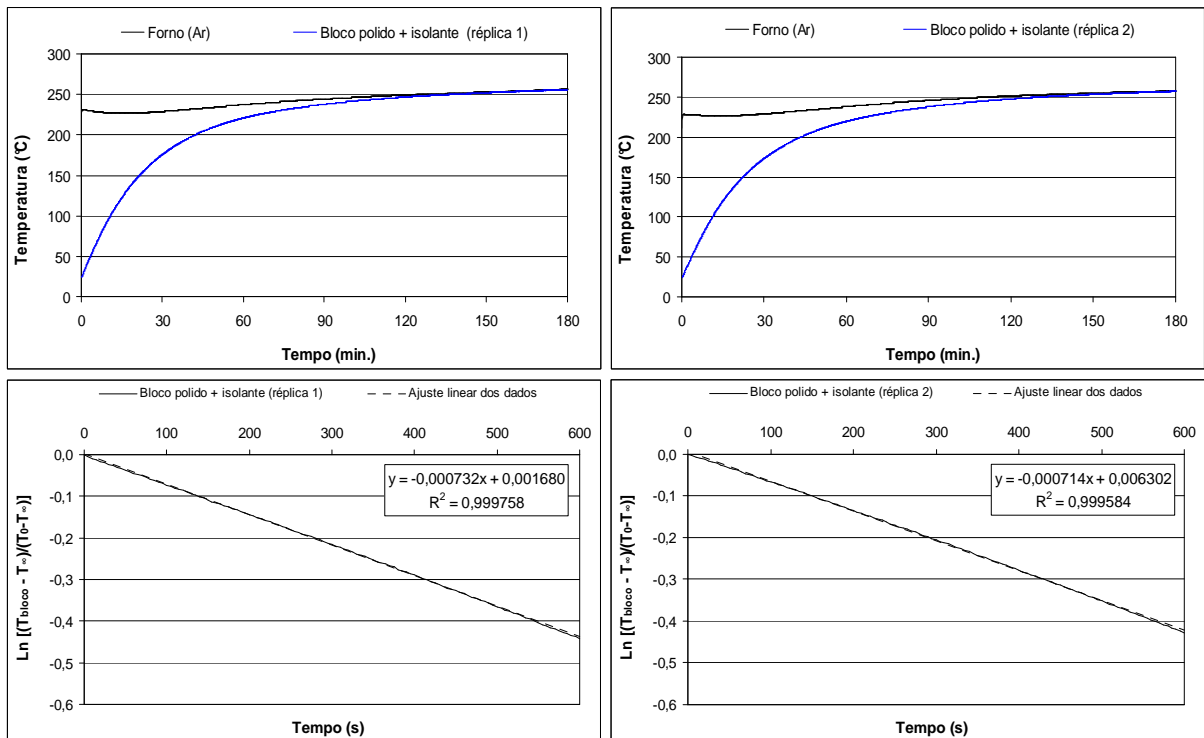


Figura 4.22 – Temperatura do bloco e do forno e logaritmo natural da temperatura adimensional do bloco em função do tempo.

O calor específico do alumínio à pressão constante, c_p , em função da temperatura é dado por (Perry, 1997):

$$c_p = (4,8 + 0,00322 T) \times 4,184 \times (1/26,97) \quad [\text{J/g}^\circ\text{C}] \quad (4.3)$$

Para 27,5°C, temperatura média dos blocos no intervalo de 0 a 10 minutos dos testes, o calor específico à pressão constante é 894,84 J/kg°C. A massa do bloco de alumínio é 2.675 g.

Conforme a Figura 4.22, a inclinação da reta para as réplicas 1 e 2 são, respectivamente, -0,000732 e -0,000714. Assim, o coeficiente médio de transferência de calor por convecção o durante a cocção da pizza, calculado pela Equação (4.1) é:

$$\bar{h}_{\text{conv}} = 26,2 \pm 0,5 \text{ W/m}^2\text{C}$$

A aplicação da Equação (4.1) é válida somente se o h_{conv} for constante ao longo do tempo, o que não é verdade, pois o h_{conv} depende da temperatura do bloco e este varia com o tempo de aquecimento. Em vez de usar a regressão linear dos dados da temperatura, calcular-se-á o coeficiente de transferência de calor pela Equação (4.4):

$$mc_p \frac{\Delta T_{\text{polido}}}{\Delta t} = h_{\text{conv}} A_{\text{bloco}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{polido}}) \quad (4.4)$$

onde ΔT é a variação da temperatura do bloco entre duas aquisições consecutivas e o intervalo de tempo entre estas aquisições é $\Delta t=15\text{s}$.

A Figura 4.23 apresenta o gráfico dos valores h_{conv} pelo tempo de aquecimento do bloco calculado pela Equação (4.4) e aquele calculado pela Equação (4.1).

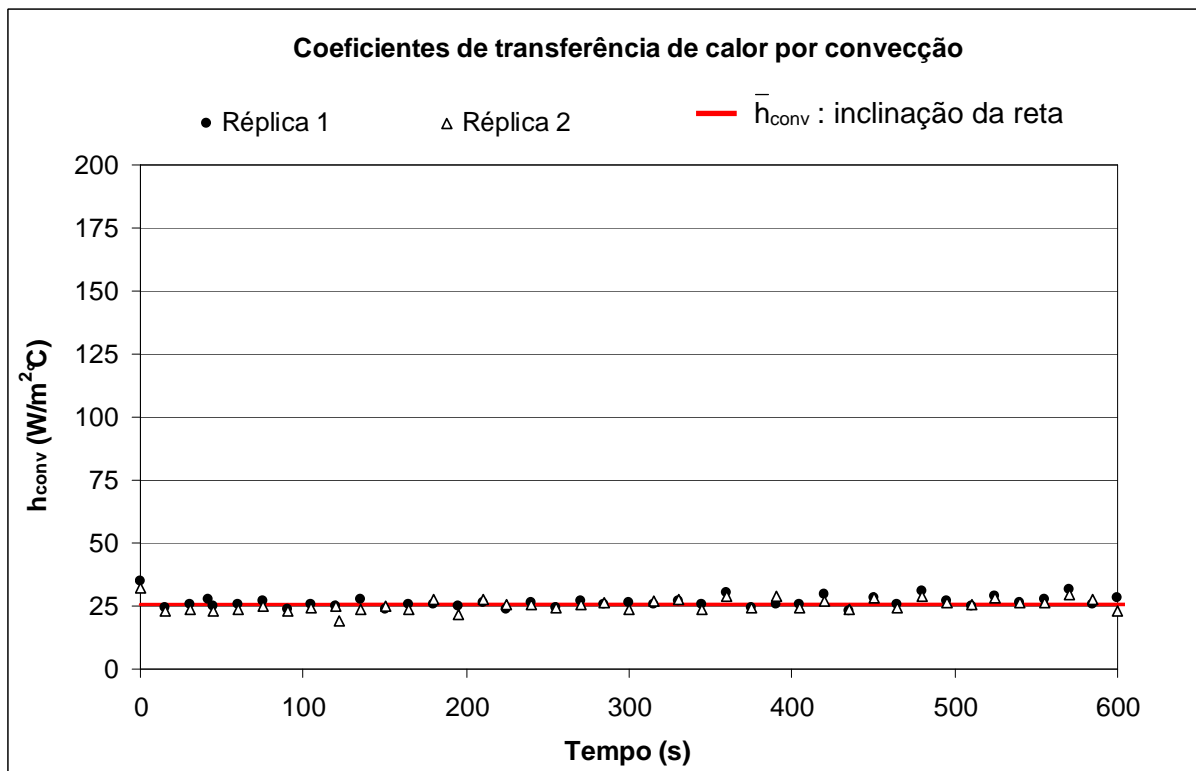


Figura 4.23 – Coeficientes de transferência de calor por convecção para o bloco durante o aquecimento.

Fazendo-se a média dos valores de h_{conv} calculados pela Equação (4.4), obtém-se o seguinte valor:

$$\bar{h}_{conv} = 26,3 \pm 2,3 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Nota-se que ambos os coeficientes, aquele calculado pela Equação (4.1) e aquele calculado pela Equação (4.4), apresentam uma diferença inferior a 1%. Assim, assumindo-se um valor constante para h_{conv} durante esta fase do aquecimento, o erro associado a esta hipótese será pequeno.

O número de Biot obtido pela aplicação da Equação (3.47) para este caso foi:

$$Bi = \frac{h_{conv} L_C}{K_{bloco}} = \frac{26,2 \times 0,013 / 2}{237} = 7,2 \cdot 10^{-4}$$

Assim, a condição de Biot $< 0,1$ é satisfeita e o método da capacitância global pode ser utilizado, sendo o erro associado ao seu uso pequeno.

No teste com bloco polido apoiado diretamente sobre o material da base, a transferência de calor dá-se não só por convecção, mas também por condução entre a base

aquecida e o bloco. Nota-se pela Equação (4.5) que a diferença de energia que entra no volume de controle, no caso o próprio bloco, entre os testes realizados com o bloco polido e com o bloco polido sobre uma superfície isolante é aquela transferida por condução ao bloco, ou seja:

$$mc_p \frac{dT_{\text{polido}}}{dt} = h_{\text{conv}} A_{\text{bloco}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{polido}}) + h_{\text{cond}} A_{\text{bloco}} (T_{\text{forma}} - T_{\text{polido}}), \quad (4.5)$$

onde T_{forma} é a temperatura da superfície em contato com o bloco.

Conforme proposto no Capítulo III, definir-se-á parcela de calor transferida por condução de forma similar à transferida por convecção.

$$q_{\text{cond}} \equiv h_{\text{cond}}^* A_{\text{bloco}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{polido}}) \quad (4.6)$$

Assim, a energia acumulada no bloco será:

$$mc_p \frac{dT_{\text{polido}}}{dt} = h_{\text{global}}^{\text{polido}} A_{\text{bloco}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{polido}}) \quad (4.7)$$

onde,

$$h_{\text{global}}^{\text{polido}} = h_{\text{conv}} + h_{\text{cond}}^* \quad (4.8)$$

Assim, a solução de Equação (4.7) pode ser dada pela Equação (4.9) e, de forma similar à convecção, o $h_{\text{global}}^{\text{polido}}$ pode ser obtido pela inclinação da reta obtida da curva de

$$\ln \left(\frac{T_{\text{polido}} - T_{\text{ar}}}{T_0 - T_{\text{ar}}} \right) \times t:$$

$$\frac{T_{\text{polido}} - T_{\text{ar}}}{T_0 - T_{\text{ar}}} = \exp \left[- \left(\frac{h_{\text{global}}^{\text{prata}} A_{\text{bloco}}}{mc_p} \right) t \right] \quad (4.9)$$

Pode-se verificar pela Figura 4.24 que há diferença entre as inclinações das retas para o aquecimento do bloco polido e do bloco polido com isolante. Essa diferença é devida à condução.

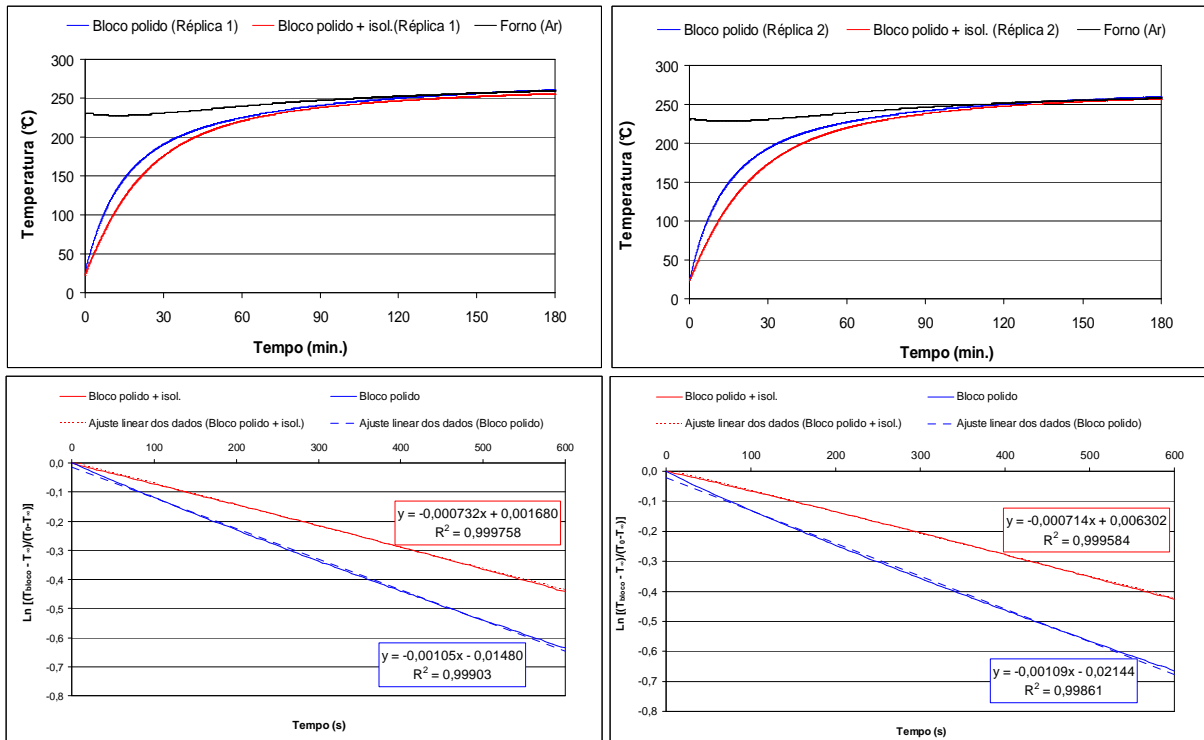


Figura 4.24 – Temperatura do bloco e do forno e logaritmo natural da temperatura adimensional dos blocos polido e polido com isolante em função do tempo.

O coeficiente de transferência de calor global médio, dado pelas inclinações das curvas do logaritmo natural da temperatura adimensional para o bloco polido é:

$$\bar{h}_{global}^{polido} = 38,8 \pm 1,0 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Subtraindo-se o \bar{h}_{conv} , calculado anteriormente pela Equação (4.1), do $\bar{h}_{global}^{polido}$, calculado pela Equação (4.9), teremos o coeficiente modificado de transferência de calor por condução médio:

$$\bar{h}_{cond}^* = 12,6 \pm 1,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Procedendo-se da mesma forma que para o h_{conv} , calcularam-se os valores de h_{global}^{polido} pela Equação (4.10).

$$mc_p \frac{\Delta T_{polido}}{\Delta t} = h_{global}^{polido} A_{bloco} (T_{ar} - T_{polido}) \tag{4.10}$$

A Figura 4.25 apresenta os valores para os coeficientes modificados de transferência de calor por condução calculados a partir da subtração dos valores de h_{conv} ,

calculados pela Equação (4.4), dos valores de $h_{\text{global}}^{\text{polido}}$, calculados pela Equação (4.10). O intervalo de tempo entre duas aquisições consecutivas de temperatura do bloco foi $\Delta t=15\text{s}$.

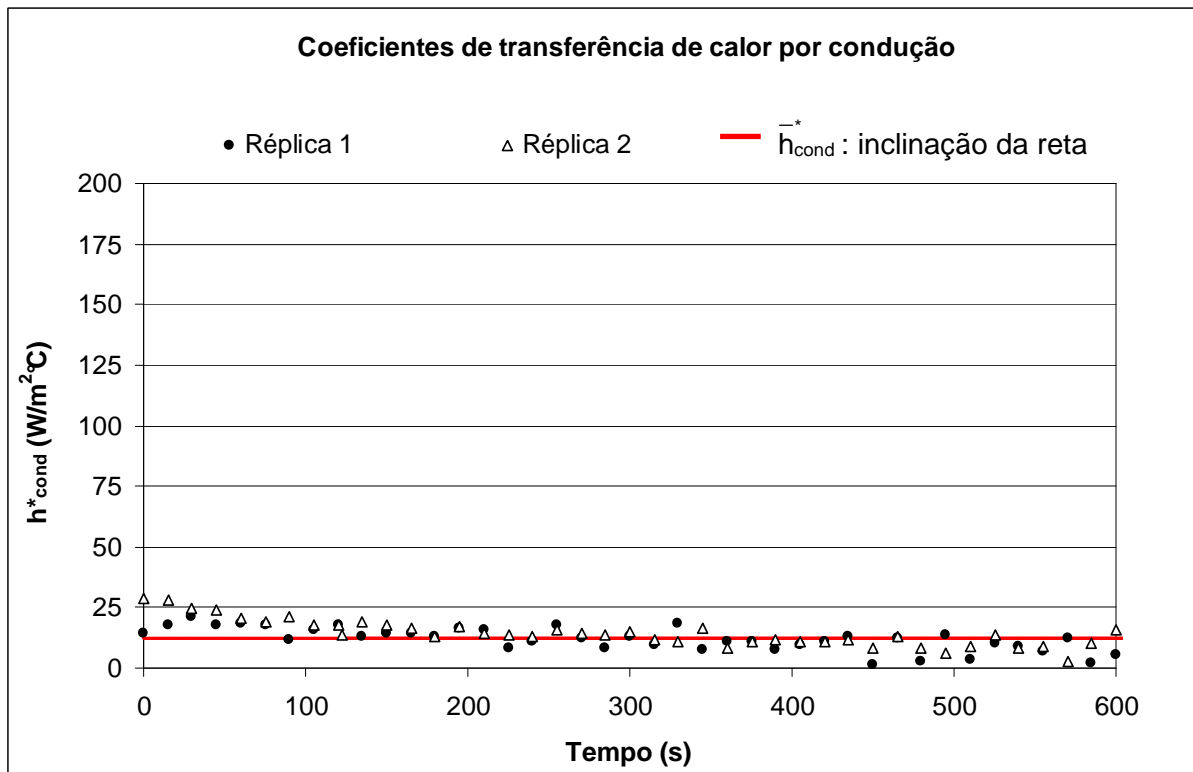


Figura 4.25 – Coeficientes modificados de transferência de calor por condução para o bloco durante o aquecimento.

Nota-se pela Figura 4.25 que os valores dos coeficientes modificados de transferência de calor por condução tendem a decrescer ao longo do processo de aquecimento. Como h_{cond}^* depende da diferença de temperatura entre o ar e o bloco, a medida que o bloco vai se aquecendo, esta diferença diminui, diminuindo também os valores do coeficiente de transferência de calor.

O valor médio dos valores de h_{cond}^* apresentados na Figura 4.25 é:

$$\bar{h}_{\text{cond}}^* = 13,0 \pm 5,29 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Utilizando-se o bloco preto apoiado diretamente sobre o material da base, a transferência de calor dá-se não só por convecção, mas também por condução entre a base aquecida e o bloco e por radiação, entre as superfícies aquecidas do forno e o bloco. O acúmulo de energia no bloco preto é dado pela Equação (4.11), apresentada a seguir. Comparando-se esta equação com a Equação (4.5), nota-se que a diferença de energia que entra no volume de controle entre os testes realizados com o bloco preto e com o bloco polido é apenas aquela transferida por radiação ao bloco.

$$m c_p \frac{dT_{\text{preto}}}{dt} = A_{\text{bloco}} h_{\text{conv}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{preto}}) + A_{\text{bloco}} h_{\text{cond}} (T_{\text{forma}} - T_{\text{preto}}) + A_{\text{bloco}} \varepsilon_{\text{bloco}} \sigma (T_s^4 - T_{\text{preto}}^4) \quad (4.11)$$

Conforme proposto no Capítulo III, definir-se-á a parcela de calor transferida por radiação de forma similar à transferida por convecção.

$$q_{\text{rad}} \equiv h_{\text{rad}}^* A_{\text{bloco}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{bloco}}) \quad (4.12)$$

onde,

$$h_{\text{rad}}^* = \frac{q_{\text{rad}}}{A_{\text{bloco}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{bloco}})} = \frac{\varepsilon_{\text{bloco}} \sigma (T_s^4 - T_{\text{bloco}}^4)}{(T_{\text{ar}} - T_{\text{bloco}})} \quad (4.13)$$

Assim, a energia acumulada no bloco preto será:

$$m c_p \frac{dT_{\text{preto}}}{dt} = h_{\text{global}}^{\text{preto}} A_{\text{bloco}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{preto}}) \quad (4.14)$$

onde,

$$h_{\text{global}}^{\text{preto}} = h_{\text{conv}} + h_{\text{cond}}^* + h_{\text{rad}}^* \quad (4.15)$$

Substituindo a Equação (4.8) na Equação (4.15):

$$h_{\text{rad}}^* = h_{\text{global}}^{\text{preto}} - h_{\text{global}}^{\text{polido}} \quad (4.16)$$

Note que o “coeficiente de transferência de calor por radiação” dado pela Equação (4.13), h_{rad}^* , é também função da temperatura do ar, diferentemente daquele definido por Incropera e Dewitt (1998) em que:

$$h_{\text{rad}} = \varepsilon_{\text{bloco}} \sigma (T_s^2 + T_{\text{bloco}}^2) (T_s + T_{\text{bloco}}) \quad (4.17)$$

A solução da Equação (4.14) é dada de forma análoga à Equação (4.7). O $h_{\text{global}}^{\text{preto}}$ é

obtido pela inclinação da reta obtida da curva de $\ln \left(\frac{T_{\text{bloco}}^{\text{preto}} - T_{\text{ar}}}{T_0 - T_{\text{ar}}} \right)$ x t:

$$\frac{T_{\text{bloco}}^{\text{preto}} - T_{\text{ar}}}{T_0 - T_{\text{ar}}} = \exp \left[- \left(\frac{h_{\text{global}}^{\text{preto}} A_{\text{bloco}}}{m c_p} \right) t \right] \quad (4.18)$$

Pela Figura 4.26 é possível observar a diferença entre as inclinações das retas para o aquecimento do bloco polido e do bloco preto. Essa diferença é devida à radiação.

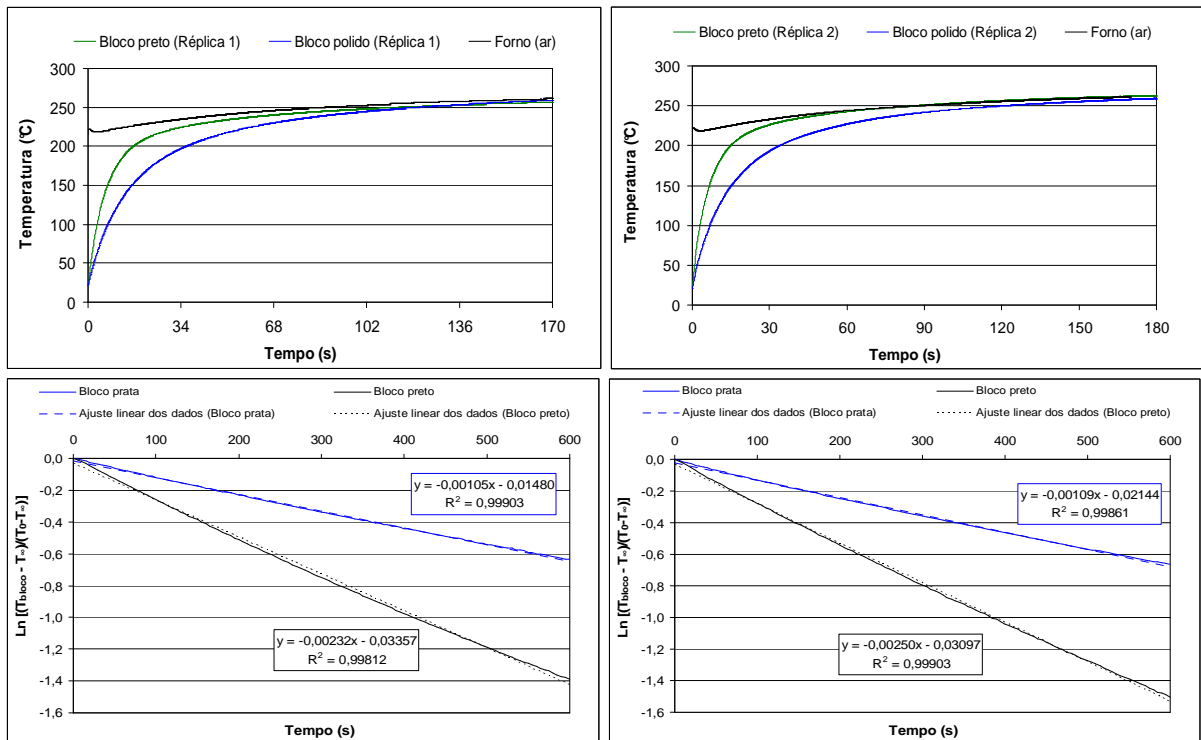


Figura 4.26 – Temperatura do bloco e do forno e logaritmo natural da temperatura adimensional dos blocos preto e polido em função do tempo.

O coeficiente de transferência de calor global médio, dado pelas inclinações das curvas do logaritmo natural da temperatura adimensional para o bloco preto é:

$$\bar{h}_{\text{global}}^{\text{preto}} = 87,4 \pm 4,6 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Subtraindo-se o $\bar{h}_{\text{global}}^{\text{polido}}$, calculado anteriormente, do $\bar{h}_{\text{global}}^{\text{preto}}$, teremos o coeficiente modificado de transferência de calor por radiação médio:

$$\bar{h}_{\text{rad}}^* = 48,6 \pm 3,6 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

A Figura 4.27 apresenta os valores para os coeficientes de transferência de calor por radiação calculados de duas formas: \bar{h}_{rad}^* calculados pela Equação (4.20), onde os valores de $\bar{h}_{\text{global}}^{\text{polido}}$, calculados pela Equação (4.10), são subtraídos dos valores de $\bar{h}_{\text{global}}^{\text{preto}}$,

calculados pela Equação (4.19), e h_{rad} calculados a partir da Equação (4.21). O intervalo de tempo entre duas aquisições consecutivas de temperatura foi $\Delta t=15s$. As Equações (4.19) a (4.23) são mostradas a seguir:

$$mc_p \frac{\Delta T_{preto}}{\Delta t} = h_{global}^{preto} A_{bloco} (T_{ar} - T_{preto}) \quad (4.19)$$

$$h_{rad}^* = \frac{q_{rad}}{A_{bloco} (T_{ar} - T_{preto})} = h_{global}^{preto} - h_{global}^{polido} = \frac{mc_p \frac{\Delta T_{preto}}{\Delta t} - mc_p \frac{\Delta T_{polido}}{\Delta t}}{A_{bloco} (T_{ar} - T_{preto})} \quad (4.20)$$

$$h_{rad} = \frac{mc_p \frac{\Delta T_{preto}}{\Delta t} - mc_p \frac{\Delta T_{polido}}{\Delta t}}{A_{bloco} (T_s - T_{preto})} \quad (4.21)$$

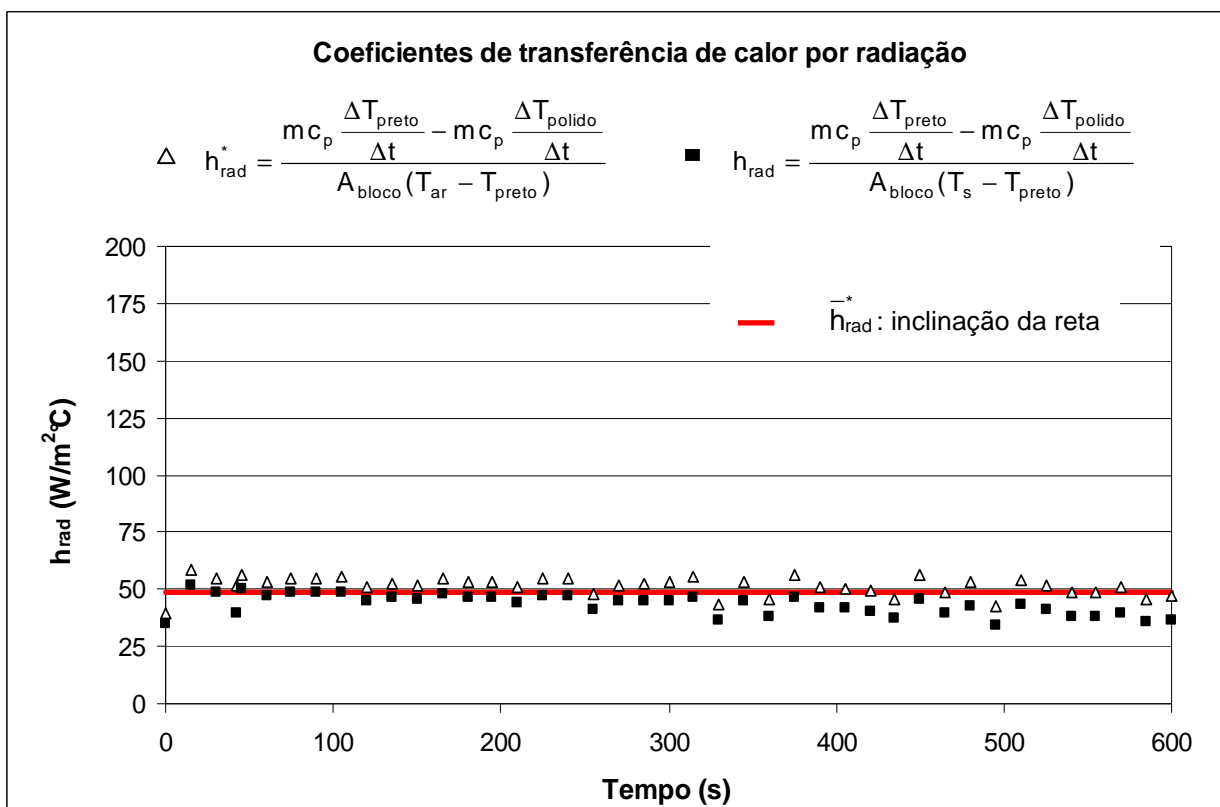


Figura 4.27 – Coeficientes de transferência de calor por radiação para o bloco durante o aquecimento, calculados pela técnica dos blocos.

As médias dos coeficientes de transferência de calor por radiação calculados por essas duas equações são:

$$\bar{h}_{\text{rad}}^* = 50,6 \pm 4,1 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$\bar{h}_{\text{rad}} = 43,3 \pm 4,7 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Nota-se que a diferença entre o valor médio obtido pela Equação (4.20) para o coeficiente modificado de transferência de calor por radiação, h_{rad}^* , e aquele obtido pela inclinação da reta é de aproximadamente 4%. Assim, conclui-se que o erro associado ao uso da inclinação da reta para o cálculo deste coeficiente é pequeno, sendo esta uma boa alternativa para se estimar a contribuição da radiação.

Foram, ainda, calculados os valores de h_{rad} pela forma convencional, com a aplicação da Equação (4.17) e pela aplicação da Equação (4.22). A média das duas réplicas para esses valores são apresentados na Figura 4.28:

$$h_{\text{rad}}^* = \frac{\varepsilon_{\text{bloco}} \sigma (T_s^4 - T_{\text{bloco}}^4)}{(T_{\text{ar}} - T_{\text{bloco}})} \quad (4.22)$$

As temperaturas da superfície, T_s , utilizadas tanto na aplicação da Equação (4.17), quanto da Equação (4.22) são temperaturas médias, calculadas pela média aritmética das temperaturas médias de cada superfície do forno.

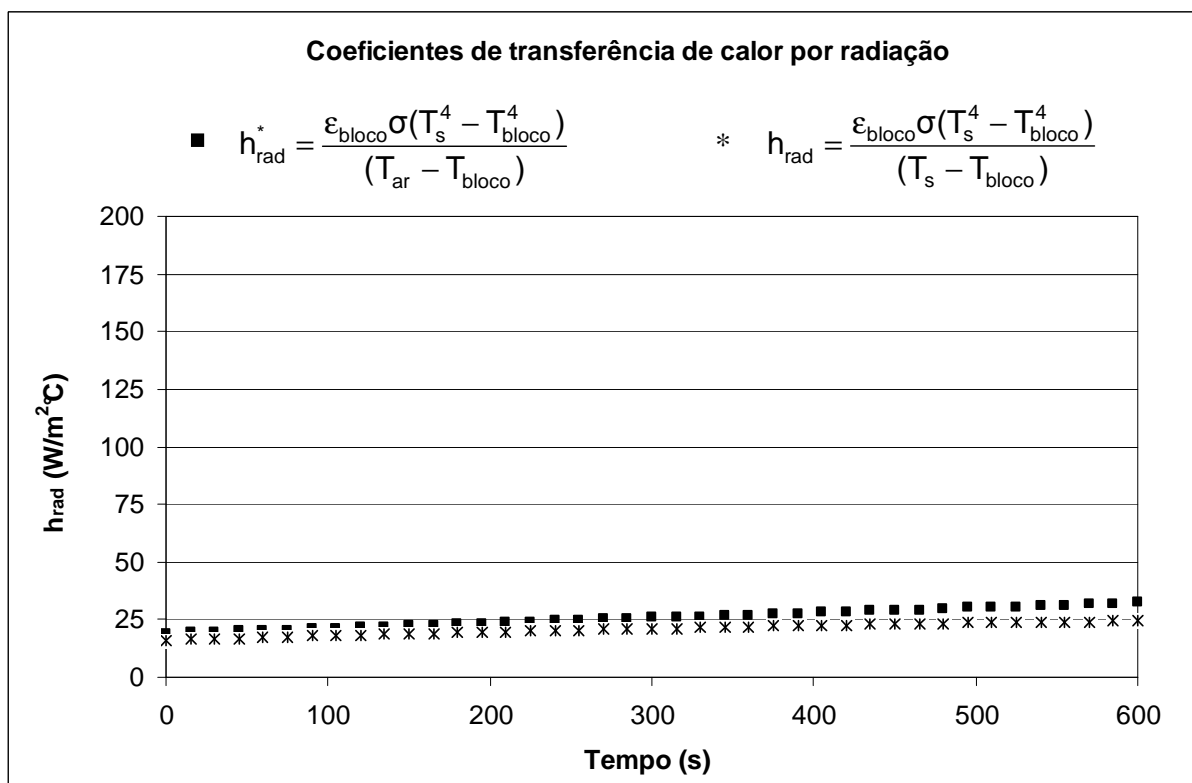


Figura 4.28 – Coeficientes de transferência de calor por radiação para o bloco durante o aquecimento, calculados utilizando-se a temperatura das superfícies.

Pela Figura 4.28 nota-se que os coeficientes de transferência de calor por radiação seguem a mesma tendência. A inclinação dos pontos dá-se pela diminuição da diferença entre a temperatura do bloco e da superfície do forno e da diminuição entre a temperatura do ar e do bloco. A média dos dados obtidos no gráfico apresentado na Figura 4.28 foi de $25,8 \pm 4,1 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para \bar{h}_{rad}^* e $21,6 \pm 2,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para \bar{h}_{rad} .

Nota-se, ainda, que os valores dos coeficientes de transferência de calor por radiação apresentados na Figura 4.28 são bastante inferiores comparados àqueles determinados pelas Equações (4.20) e (4.21). Isto se deve provavelmente ao fato de que a temperatura da superfície foi obtida pela média das temperaturas médias de todas as superfícies. As temperaturas médias de todas as superfícies do forno eram bastante próximas umas das outras. No entanto, como as resistências estavam fixadas por detrás das superfícies e nelas encostadas, regiões mais quentes foram observadas, contribuindo, provavelmente, de forma significativa para a parcela de calor transferido por radiação e, conseqüentemente, para os valores de h_{rad} , uma vez que estes são fortemente dependentes da temperatura. Essas regiões são observadas nas imagens termográficas do interior do forno, apresentadas na

Figura 4.29. Essa diferença também pode ser observada quando se calcula as parcelas de calor transferido por radiação subtraindo-se o acúmulo de energia no bloco polido da energia acumulada no bloco preto e utilizando-se a diferença das temperaturas da superfície e do bloco na quarta potência, conforme apresenta a Figura 4.30. Por este fato, acredita-se ser a técnica dos blocos mais adequada à determinação qualitativa das parcelas de calor transferidas por radiação em uma cavidade, já que segmentar as superfícies nas regiões mais quentes, calcular coeficientes de forma entre cada uma dessas regiões e o bloco e instrumentar esta cavidade de forma a obter uma temperatura média representativa de toda a superfície, seria demasiadamente trabalhoso.

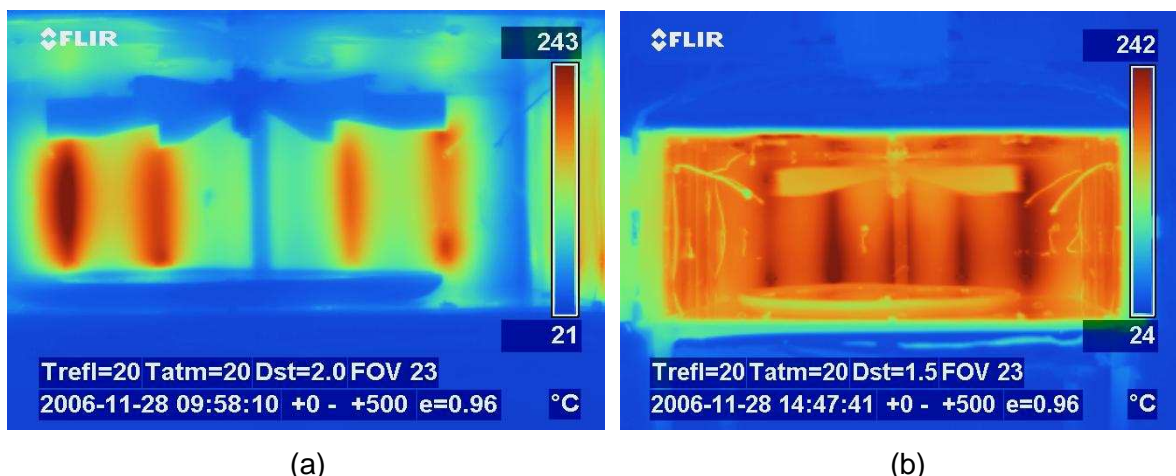


Figura 4.29 – (a) Imagens termográficas do interior do forno, obtidas no início de seu aquecimento (esquerda) e (b) no regime permanente.

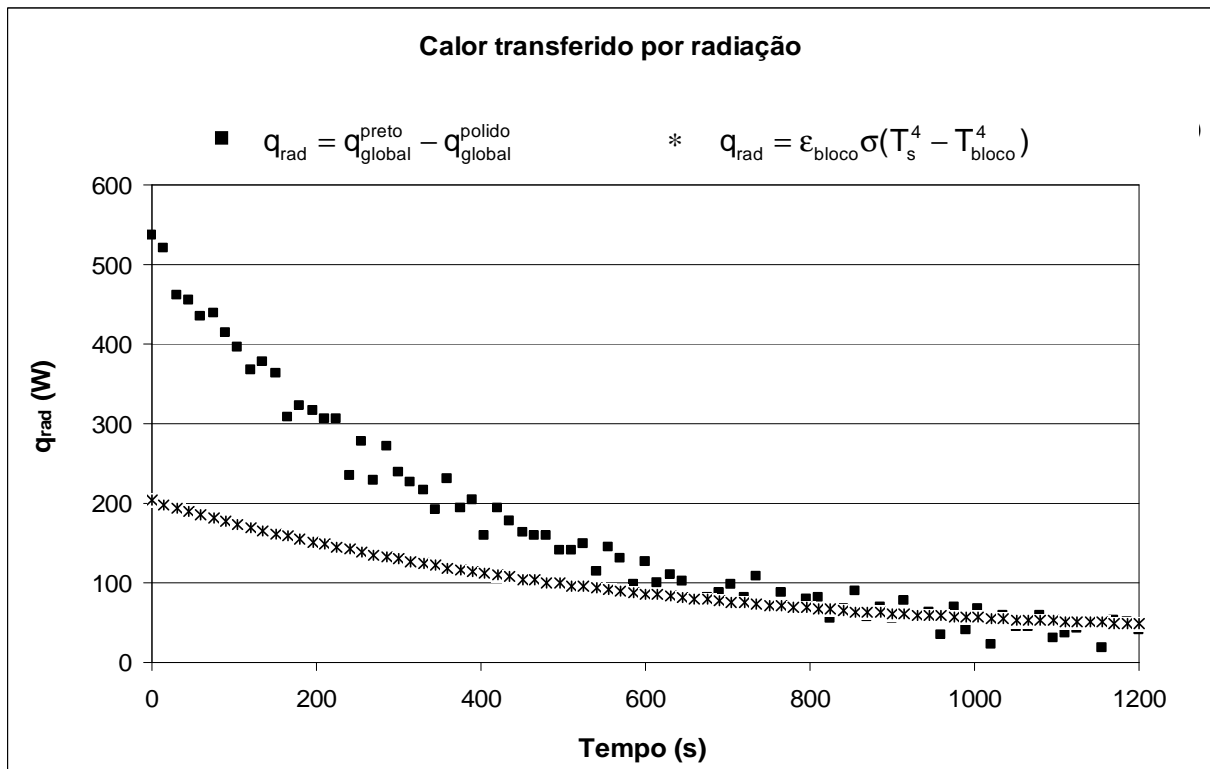


Figura 4.30 – Calor transferido por radiação ao bloco.

Durante os testes com os blocos foi mantida a potência de 726W. O calor total médio absorvido pelo bloco foi de 618W. Essa diferença de pouco mais de 100W deve-se, provavelmente, à perda de calor pela superfície externa do forno e, principalmente, pela porta, uma vez que nesta não havia uma camada de isolamento térmico como no restante do forno. Isso pode ser evidenciado pela Figura 4.31 que apresenta uma imagem termográfica externa do forno fechado.

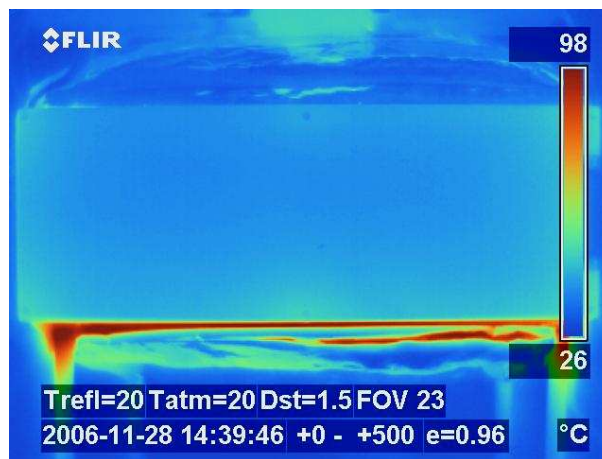


Figura 4.31 – Imagem termográfica da vista frontal do forno fechado.

4.3.2.1 Conclusão

Uma estimativa qualitativa para as parcelas de calor transferidas por convecção, radiação e condução foi obtida nesta etapa, avaliando-se o mecanismo de troca térmica predominante durante a cocção da pizza. Os coeficientes de transferência de calor foram avaliados até os 600s de aquecimento do bloco, pois até este tempo a temperatura média da superfície do bloco se aproxima à temperatura da superfície da pizza durante a cocção.

A quantificação das taxas de calor que atingem a pizza foi feita pela determinação dos seus coeficientes de transferência de calor. O coeficiente médio de transferência de calor por convecção, h_{conv} , foi avaliado pelo método da capacitância global e os valores de h_{conv} ao longo do processo de aquecimento foram calculados pela Equação (4.4), para um bloco polido apoiado sobre uma superfície termicamente isolante. Os coeficientes médios de transferência de calor por condução e por radiação foram obtidos pela associação do método da capacitância global, pelo qual foram estimados os coeficientes médios de transferência de calor globais, para o bloco polido apoiado diretamente sobre a base do forno (convecção + condução) e para o bloco preto (radiação+condução+convecção). Pela aplicação da técnica dos blocos, foi comparado o comportamento térmico desses dois blocos e determinados os coeficientes médios de transferência de calor por condução, \bar{h}_{cond}^* e por radiação, \bar{h}_{rad}^* . Note que o sinal (*) é utilizado para diferenciar o coeficiente de transferência de calor por radiação proposto neste trabalho e calculado pela Equação (4.22), daquele proposto por Incropera e Dewitt (1998) e calculado pela Equação (4.17). Os coeficientes de transferência de calor por condução ao longo do processo de cocção também foram estimados pela subtração dos valores de h_{conv} , calculados pela Equação (4.14), dos coeficientes globais de troca térmica para o bloco polido com isolante, $\bar{h}_{global}^{polido}$, calculados pela Equação (4.10). Os coeficientes de transferência de calor por radiação ao longo do processo de cocção, h_{rad} e h_{rad}^* , foram estimados pelas Equações (4.13) e (4.17) e pelas Equações (4.20) e (4.21). Nota-se que nas Equações (4.13) e (4.17) os coeficientes h_{rad}^* e h_{rad} , respectivamente, são calculados utilizando-se o calor fornecido por radiação obtido por $q_{rad} = A_{bloco} \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{bloco}^4)$. Nas Equações (4.20) e (4.21), h_{rad}^* e h_{rad} são estimados utilizando-se o calor por radiação obtido por $q_{rad} = \frac{mc_p \Delta T_{preto}}{\Delta t} - \frac{mc_p \Delta T_{prata}}{\Delta t}$.

A Tabela 4.19 traz um resumo dos coeficientes de transferência de calor calculados.

Tabela 4.19 – Coeficientes de transferência de calor obtidos.

	Coeficientes de transferência de calor, h [$W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$]			
	Convecção	Condução	Radiação	
			h_{rad}^*	h_{rad}
<i>Método da capacitância global</i>	$26,2 \pm 0,5$	$12,6 \pm 1,5$	$48,6 \pm 3,6$	-
<i>Técnica dos blocos (média dos dados)</i>	$26,3 \pm 2,3$	$13,0 \pm 5,29$	$50,6 \pm 4,1$	$43,3 \pm 4,7$
<i>Temperatura das superfícies</i>	-	-	$25,8 \pm 4,1$	$21,6 \pm 2,5$

Pela Tabela 4.19 nota-se que o mecanismo de transferência de calor predominante na cocção da pizza foi a radiação, seguida da convecção e da condução. Nota-se ainda que os valores médios para o coeficiente de troca térmica por radiação calculados com a temperatura média das superfícies são aproximadamente 50% menores que aqueles calculados pela técnica dos blocos. A técnica dos blocos para o cálculo da parcela de calor transferida ao bloco por radiação parece ser mais indicada. Enquanto o uso da temperatura média das superfícies não leva em conta a contribuição das regiões mais quentes para a radiação, o bloco preto absorve toda a energia que nele chega, considerando inclusive o calor emitido em maior ou menor intensidade por tais regiões.

Pode-se observar ainda que coeficiente de calor por radiação calculado conforme proposto neste trabalho, pelas Equações (4.20) e (4.22), concorda em ordem de grandeza com aqueles obtidos pelas Equações (4.17) e (4.21). Isso evidencia que temperatura do ar é uma função da temperatura das superfícies. Em um meio convectivo, a temperatura do ar é bastante homogênea e próxima à temperatura das superfícies, podendo-se utilizar um coeficiente de transferência de calor por radiação expresso de forma similar ao coeficiente convectivo, ou seja, em função da diferença de temperatura entre o ar e o bloco.

A condução foi o mecanismo de menor influência durante o processo de cocção de pizza. Isto se deve, provavelmente, ao baixo contato entre a forma e o bloco, caracterizando uma alta resistência térmica de contato entre eles.

4.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA MASSA DA PIZZA

A seguir serão determinadas a difusividade térmica e condutividade térmica da pizza. Embora esses dados não sejam efetivamente utilizados neste trabalho, serão de extrema importância quando se fizer necessária a utilização de simulação numérica para projetos de fornos de pizzas.

Tanto para a determinação da difusividade térmica quanto para a determinação da condutividade térmica, as pizzas foram assadas no protótipo do forno, durante 0 (crua), 1, 2, 3, 4 e 5 minutos. Após assada, a massa foi acondicionada dentro do tubo cilíndrico de cobre de comprimento $L_{\text{tubo}} = 0,22 \text{ m}$, diâmetro $D_{\text{tubo}} = 0,052 \text{ m}$ e espessura da parede do tubo $e_{\text{tubo}} = 0,001 \text{ m}$. Para o acondicionamento dentro do tubo, a massa foi cortada em círculos de mesmo diâmetro do tubo (Figura 4.32a) e colocada no seu interior em camadas horizontais (Figura 4.32b). O número de camadas foi aquele necessário ao completo preenchimento do tubo. Pequenos pedaços de massa de pizza foram, ainda, utilizados para o preenchimento dos espaços formados pelas irregularidades das camadas de massa.



(a)



(b)

Figura 4.32 – (a) Massa cortada em círculos e (b) disposição das camadas de massa no interior do tubo.

4.4.1 Difusividade térmica

A difusividade térmica da massa da pizza foi determinada pelo método da curva de penetração de calor, conforme descrito no Capítulo III. A razão entre o comprimento do tubo e seu diâmetro, superior a 4, caracterizou um fluxo de calor unidimensional. Cada teste foi repetido 3 vezes. Assim que o cilindro contendo a amostra foi imerso no banho de água, cuja temperatura foi controlada e mantida em 70°C , as temperaturas do centro geométrico da amostra e do banho foram registradas, simultaneamente. A partir dos dados obtidos, foram traçados gráficos do logaritmo da temperatura adimensional em função do tempo. A inclinação da parte linear, m , dessa curva foi utilizada para o cálculo da difusividade térmica, aplicando-a na Equação (3.49):

$$\alpha = \frac{2,303}{\left(\frac{5,783}{R_{\text{cil}}^2}\right) f_h}$$

onde R_{cil} é o raio do tubo cilíndrico contendo a amostra e $f_h = -\frac{1}{m}$.

A Figura 4.33 apresenta imagens do aparato experimental utilizado para determinação da difusividade térmica.

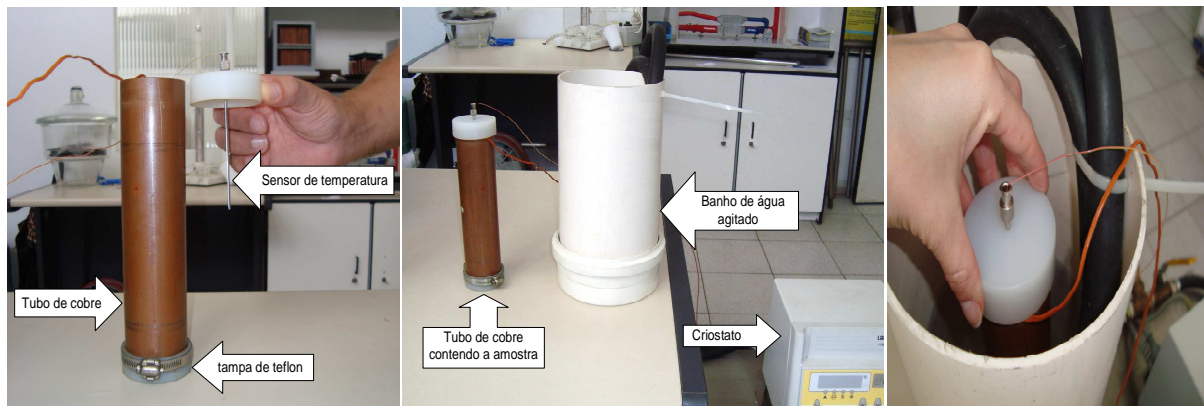


Figura 4.33 – Imagens do aparato experimental utilizado para determinação da difusividade térmica.

A Figura 4.34 apresenta um gráfico típico da temperatura no centro geométrico da amostra e a temperatura do banho em função do tempo. A Figura 4.35 apresenta o gráfico da temperatura adimensional em função do tempo, traçado a partir da, Figura 4.34 e a parte linear dessa curva, utilizada para o cálculo da difusividade térmica.

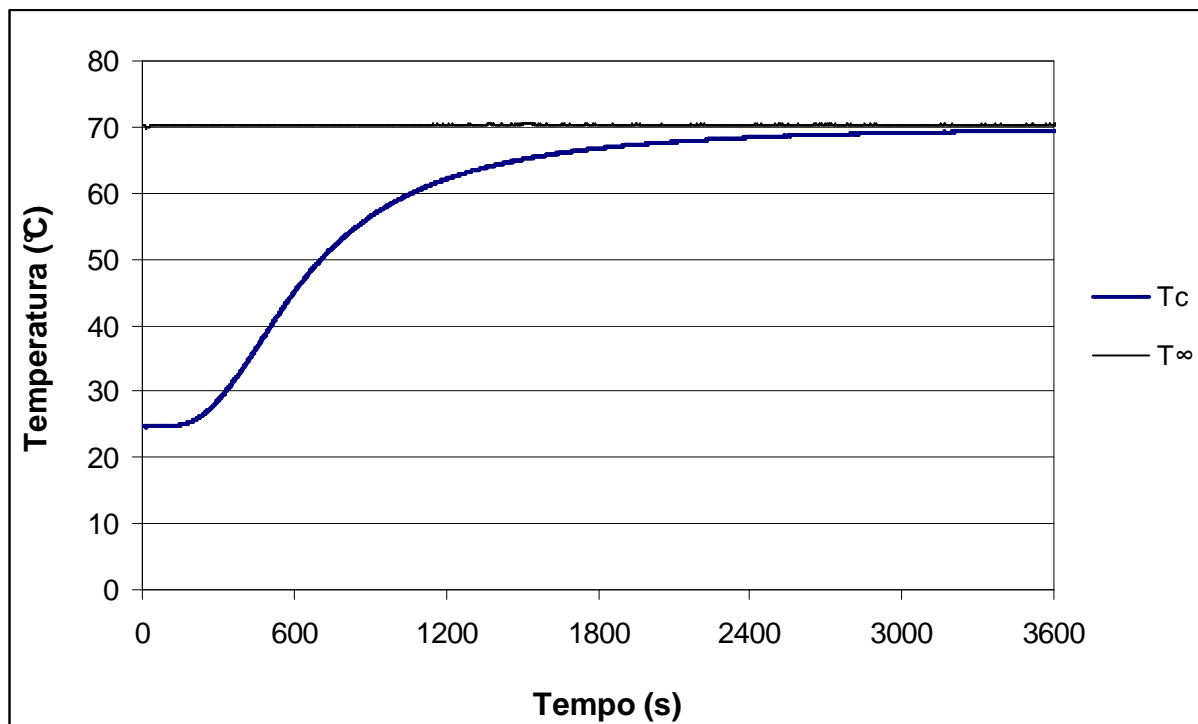


Figura 4.34 – Gráfico da temperatura do banho e do centro geométrico da amostra em função do tempo.

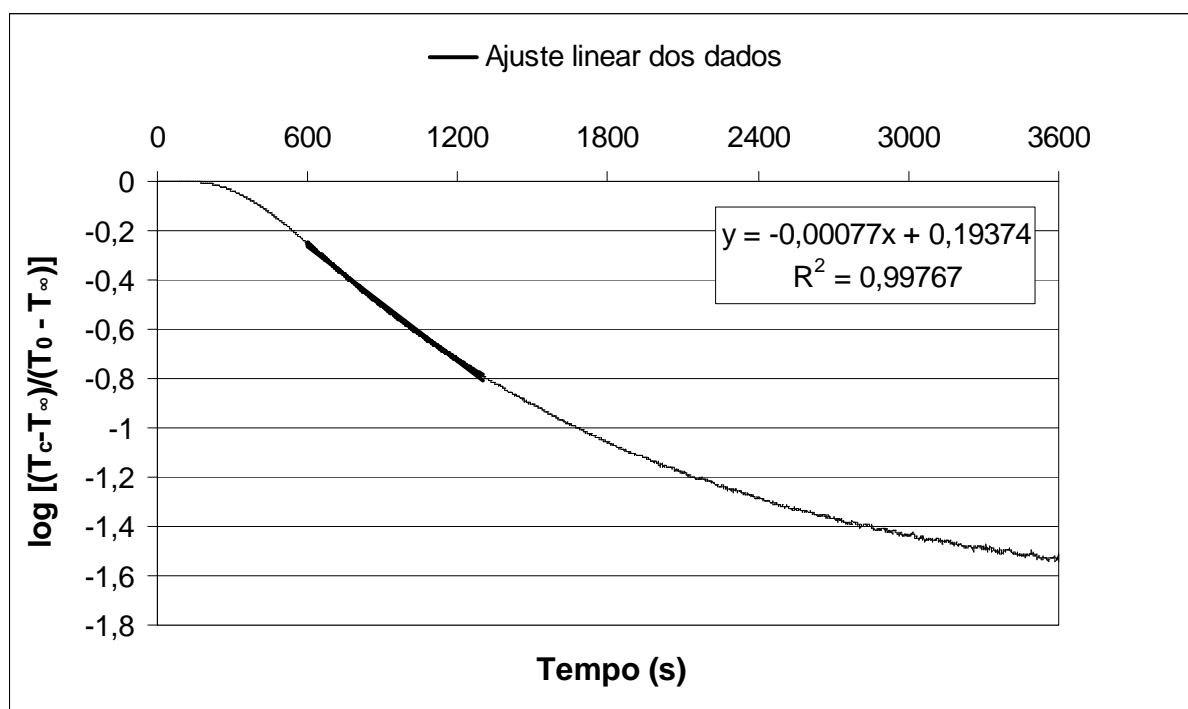


Figura 4.35 – Gráfico da temperatura adimensional em função do tempo de teste.

Pela Figura 4.35, tem-se: $m = -0,00077$ e, conseqüentemente, $f_h = 1298,7$. A difusividade térmica, calculada pela Equação (3.49) é: $\alpha = 2,07 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

A Tabela 4.20 apresenta o valor da difusividade térmica, para o meio de aquecimento a 70°C , e a perda de água para os diferentes tempos de cocção da pizza. Como diversas modificações ocorrem na massa durante a cocção (aumento de temperatura, perda de umidade, aumento de porosidade etc.) e essas mudanças podem afetar a difusividade térmica da massa, o tempo de cocção, no qual as alterações na massa estão ocorrendo de forma simultânea, foi utilizado apenas como um fator indicativo do “grau de cocção”.

Tabela 4.20 – Valores médios da difusividade térmica da massa de pizza e perda de água durante a cocção.

Tempo de cocção	Difusividade térmica (m^2/s)		Perda de água (%)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0 min.	1,86E-07	4,90E-08	-	-
1 min.	2,05E-07	1,50E-08	4,2	0,008
2 min.	2,16E-07	8,22E-09	7,2	0,008
3 min.	2,22E-07	3,33E-08	10,1	0,003
4 min.	2,60E-07	8,22E-08	13,5	0,017
5 min.	3,43E-07	3,66E-08	14,9	0,014

Os valores da difusividade térmica da massa de pizza foram submetidos a uma análise de variância, com nível de significância $\alpha=5\%$, apresentada na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 – Análise de variância dos dados de difusividade térmica da massa de pizza.

<i>Análise de variância</i>					
Fonte	Graus de Liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	F	Valor-p
Tempo de cocção	5	4,82E-14	9,64E-15	4,94	0,011
Erro	12	2,34E-14	1,95E-15		
Total	17	7,16E-14			

O valor-p obtido na análise de variância é superior ao nível de significância escolhido, logo, existe diferença estatisticamente significativa entre os valores de difusividade térmica para a massa da pizza em relação ao tempo de cocção. Dessa forma, procedeu-se com o teste de Tukey para identificar entre quais médias encontra-se essa diferença. Segundo o teste de Tukey, com nível de significância de 5%, a menor diferença significativa entre as médias é de $1,21 \cdot 10^{-7}$, ou seja, os pares cuja diferença entre as médias for superior a esse valor, diferem entre si. Pela Tabela 4.21, nota-se que a difusividade térmica das pizzas assadas em 0-4 min. não diferem significativamente entre si, no entanto, para as pizzas assadas em 0-3 min. há diferença em relação aos valores de difusividade daquelas assadas em 5 min. A pizza assada em 4 min. não diferiu significativamente da pizza assada em 5 min. Assim, assumir-se-á que até os 3 min. de cocção, cuja perda de água é próxima a 10%, a difusividade térmica da massa de pizza será de $2,07 \cdot 10^{-7} \pm 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. A partir desse tempo, até 5 min de cocção, onde há um acréscimo de cerca de 5% na perda de água, a difusividade térmica será de $3,0 \cdot 10^{-7} \pm 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. A diferença nos valores de difusividade térmica ao longo do processo de cocção deve-se principalmente à perda de água pela massa. A difusividade térmica do ar é cerca de 150 vezes maior que a da água líquida, ($2,25 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ para o ar e $1,45 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para água, segundo Incropera e Dewitt (1998). Assim, para duas amostras com mesma porosidade, é esperado que aquela que tenha menor conteúdo de água, apresente maiores valores de difusividade térmica.

O Apêndice E1 apresenta os demais gráficos das temperaturas do banho e do centro geométrico da amostra e da temperatura adimensional em função do tempo de teste.

4.4.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica foi determinada pelo método da sonda linear de aquecimento, conforme descrito no Capítulo III. Cada teste foi repetido 8 vezes. A sonda, confeccionada com um capilar de cobre selado na ponta, foi projetada com as seguintes dimensões: comprimento $L_{\text{sonda}} = 0,225$ m, diâmetro externo $D_{\text{sonda}} = 0,00156$ m e espessura da parede da sonda $e_{\text{sonda}} = 0,0005$ m. A tensão ajustada à fonte de alimentação foi de $U=9,2\text{V}$ e a corrente, $i=0,15\text{A}$. Uma resistência elétrica de constantan foi utilizada como fio aquecedor. Este fio, de comprimento total $L_{\text{fioaquecedor}} = 0,56\text{m}$ e diâmetro $D_{\text{resistência}} = 0,0001\text{m}$, foi inserido por dentro da sonda até atingir a extremidade inferior, onde o fio foi dobrado e retornado à extremidade superior. Assim, o comprimento de fio inserido no interior do capilar foi de $L_{\text{fio-sonda}}=0,45$ m.

A Figura 4.36 apresenta imagens do aparato experimental utilizado na determinação da condutividade térmica.

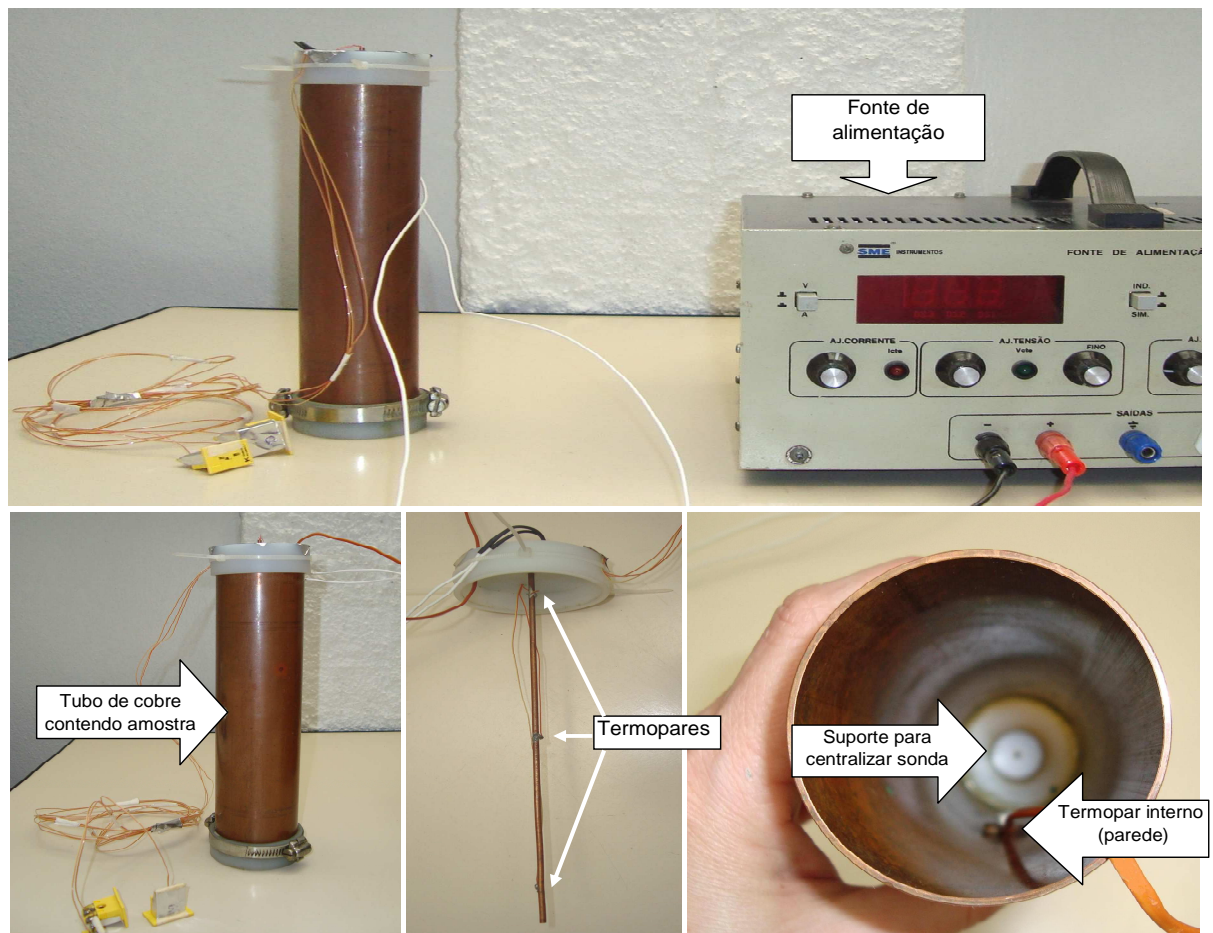


Figura 4.36 – Imagens do aparato experimental utilizado para determinação da condutividade térmica da massa de pizza.

Conforme citado no Capítulo II, para se evitar o efeito de borda recomenda-se que $\beta_{amostra}^2 > 1,7$, onde $\beta_{amostra}$ é calculado com a Equação (4.24)

$$\beta_{amostra} = \frac{r_{amostra}}{2\sqrt{\alpha t}}, \quad (4.23)$$

onde $r_{amostra}$ é o raio do recipiente contendo a amostra, α é a difusividade térmica e t é o tempo de teste.

A difusividade térmica da glicerina a 25°C é $0,977 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, segundo Incropera e Dewitt (1998). O tempo de duração do teste foi estipulado em 90 segundos. Dessa forma, aplicando-se a Equação (4.23), o valor mínimo para o diâmetro da amostra deve ser de 1,6 cm para a calibração com glicerina P.A. Utilizando-se os valores de difusividade térmica encontrados anteriormente para a massa de pizza, o diâmetro mínimo da amostra deve ser 2,9 cm. Tanto a glicerina quanto a amostra são colocadas em um tubo de diâmetro igual a 5,2cm, satisfazendo a Equação (4.24).

A porcentagem da quantidade do calor gerado na resistência, que atinge as paredes do recipiente após um determinado tempo, é estimado pela Equação (2.55). No caso da determinação da difusividade térmica, o calor que atinge o raio externo da amostra, após 90 segundos, é inferior a 0,5% do total do calor gerado.

A sonda linear infinita de fluxo de calor axial desprezível frente ao fluxo radial deve ter razão mínima entre o seu comprimento e seu diâmetro igual a 25. Com um comprimento de 22,5 cm e um diâmetro de 0,246 cm, essa razão é superior a 90.

Para que o erro de truncamento, $\xi_{TR}(\beta^2)$, seja inferior a 0,59%, conforme recomenda Vos (1955), citado por Murakami et al. (1996), o valor de β , calculado pela Equação (2.40), deve ser igual ou inferior a 0,14. Considerando-se a distância entre o fio aquecedor e o sensor de temperatura igual a 0,75mm, para a glicerina o parâmetro β será igual a 0,126 e para a amostra, o valor do parâmetro β estará entre 0,072 e 0,092, sendo o erro de truncamento inferior a 0,59% para ambos os materiais.

4.4.2.1 Calibração da sonda

A sonda linear de aquecimento foi introduzida no tubo de cobre contendo glicerina P.A. A tensão e a corrente da fonte de alimentação foram ajustadas ($U=9,2\text{V}/i=0,15\text{A}$), fornecendo a potência total de $P_{fioaquecedor}=1,38 \text{ W}$ pelo fio aquecedor (Equação (3.51)). O calor introduzido na amostra por unidade de comprimento da sonda, calculado pela Equação ((3.52), foi de $Q_{sonda} = 4,93 \text{ W/m}$.

No momento em que a fonte de alimentação foi ligada, as temperaturas da sonda e da parede do tubo foram registradas simultaneamente. A partir dos dados, foram traçados gráficos da temperatura em função do logaritmo natural do tempo e a inclinação da parte linear desta curva, $(T-T_0)/\ln(t/t_0)$, foi utilizada para o cálculo da condutividade térmica, através da Equação (3.50):

$$k = \frac{Q_{\text{sonda}}}{4\pi} \frac{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)}{(T - T_0)}$$

A Figura 4.37 apresenta o gráfico das temperaturas em função do tempo para a sonda linear de aquecimento, durante os testes de calibração utilizando glicerina. Os gráficos de temperatura em função do logaritmo natural do tempo para cada um dos testes de calibração realizados são apresentados no Apêndice E.1.

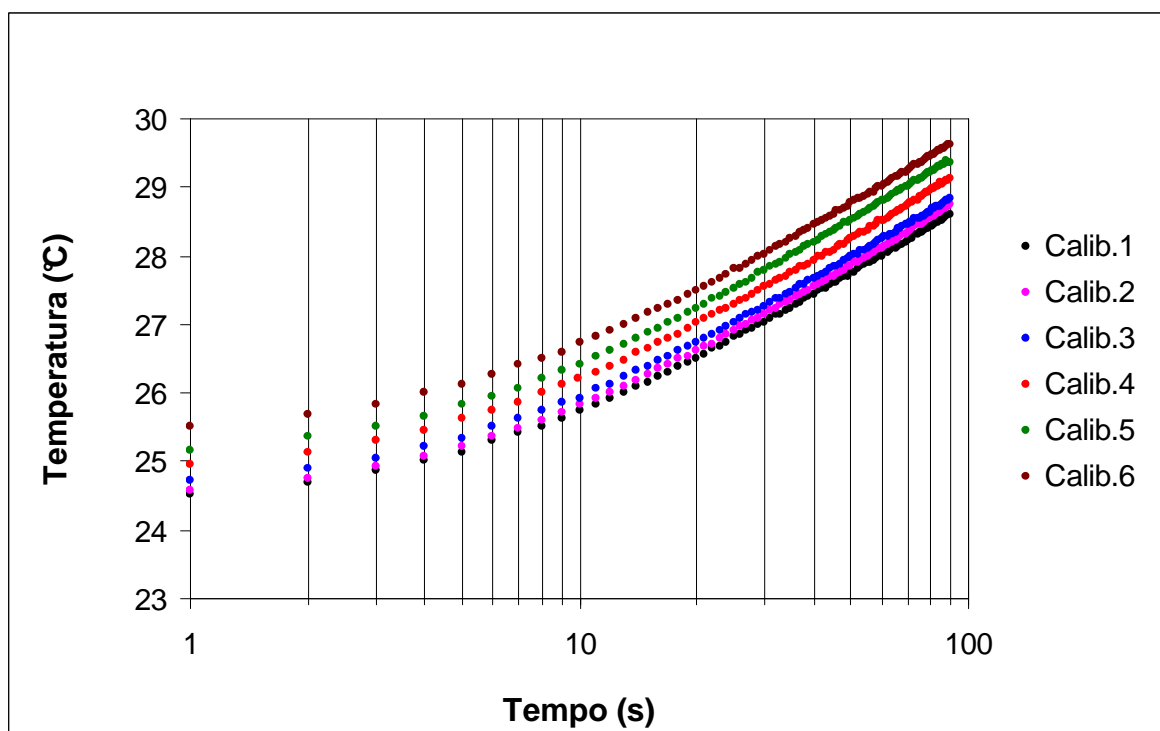


Figura 4.37 – Gráfico da temperatura em função do tempo da sonda linear de aquecimento, durante a calibração com glicerina P.A.

O valor médio obtido para a condutividade térmica da glicerina foi de $0,281 \pm 0,004$ W/m°C. O fator de correção para a sonda, dado pela razão entre a condutividade térmica obtida experimentalmente e aquela citada pela literatura ($0,285$ W/m°C a 25°C), foi de $0,985$. Os valores de condutividade térmica obtidos para a massa de pizza foram divididos por este fator. A Tabela 4.22 apresenta os valores médios para a condutividade térmica da pizza, obtidos nos diferentes tempos de cocção. Os gráficos de temperatura em função do tempo

para a sonda, durante a medida da condutividade térmica da pizza, bem como, os gráficos da parte linear da curva da temperatura em função do $\ln(t)$, utilizadas no cálculo da condutividade, são apresentados no Apêndice E.2.

Tabela 4.22 – Valores médios da condutividade térmica da massa de pizza.

<i>Tempo de cocção</i>	<i>Condutividade térmica (W/m°C)</i>	
	Média	Desvio padrão
<i>0 min.</i>	0,099	0,010
<i>1 min.</i>	0,098	0,018
<i>2 min.</i>	0,093	0,006
<i>3 min.</i>	0,093	0,004
<i>4 min.</i>	0,086	0,003
<i>5 min.</i>	0,085	0,002

A Tabela 4.23 apresenta a análise de variância realizada com os dados de condutividade térmica, com um nível de confiança de 95%.

Tabela 4.23 – Análise de variância dos dados de condutividade térmica da massa de pizza.

<i>Análise de variância</i>					
Fonte	Graus de Liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	F	Valor-p
Tempo de cocção	5	0,00134	0,000269	3,65	0,008
Erro	41	0,00302	0,000074		
Total	46	0,00436			

Como o valor-p é inferior ao nível de significância escolhido (5%), conclui-se que há diferença significativa entre os valores de condutividade térmica determinados com massas assadas em diferentes tempos de cocção. Dessa forma, procedeu-se com o teste de Tukey para identificar onde está esta diferença. Segundo o teste de Tukey, com nível de significância de 5%, a menor diferença significativa entre as médias é de 0,013. Assim, os pares cuja diferença entre as médias for superior a esse valor, diferem entre si.

Em relação ao tempo de cocção, a massa de pizza apresentou diferença significativa somente entre a massa crua e as massas assadas a partir do 5º minuto. Essa diferença se deve, provavelmente, à perda de água durante o processo de cocção. A condutividade térmica da água é aproximadamente 25 vezes maior que a do ar. Assim, a perda de água e formação dos poros na massa contribuem para o decréscimo nos valores da condutividade térmica. A massa crua e as assadas até os 4 minutos não apresentaram

diferença nos valores da condutividade térmica. Assim, ainda que haja diferença estatisticamente significativa, deve-se ponderar se é relevante considerar essa variação na prática. Como a única diferença encontrada foi entre a massa crua e as assadas em 5 minutos, assumir-se-á um valor médio constante de $0,092 \pm 0,01$ W/m°C. Considerando-se este valor médio, o erro associado a ele é inferior a 10%.

4.4.2.2 Resistência térmica da camada de ar contida entre as camadas de massa

Durante a execução deste experimento, foi cogitada a hipótese de haver, entre as camadas de massa dispostas dentro do tubo cilíndrico, pequenas camadas de ar. Essas camadas de ar podem funcionar como um desvio ao calor fornecido pela sonda linear de aquecimento e assim, ter-se na medida da condutividade térmica da massa da pizza um erro inerente a essa presença de ar. Para verificar se a camada de ar oferece resistência suficientemente grande à transferência de calor, de modo que o calor seja conduzido apenas pela massa de pizza, será empregada a analogia entre a difusão de calor e circuitos elétricos. A resistência térmica é definida como a razão entre a diferença de temperatura e a taxa de transferência de calor correspondente. (INCROPERA, DEWITT, 1998). Para a condução de calor, a resistência térmica, $R_{t,cond}$, é dada por:

$$R_{t,cond} \equiv \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q} \quad (4.24)$$

onde $T_{s,1}$ e $T_{s,2}$ são, respectivamente, as temperaturas de duas superfícies adjacentes e q é a taxa constante de calor transferido em uma determinada direção.

Como as camadas de massa de pizza e as camadas de ar estão intercaladas no tubo cilíndrico e o fluxo de calor é radial, conforme mostra a Figura 4.38(a), considerar-se-á a associação em paralelo das resistências térmicas à condução do calor desses dois componentes (Figura 4.38b). Sendo assim, a resistência térmica que aparece na Equação (4.24) será a resistência térmica equivalente desta associação, dada pela Equação (4.25):

$$R_{t,cond} = R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_{eq,pizza}} + \frac{1}{R_{eq,ar}}} \quad (4.25)$$

onde $R_{eq,pizza}$ é a resistência térmica equivalente das camadas de massa da pizza e $R_{eq,ar}$ é a resistência térmica equivalente das camadas de ar.

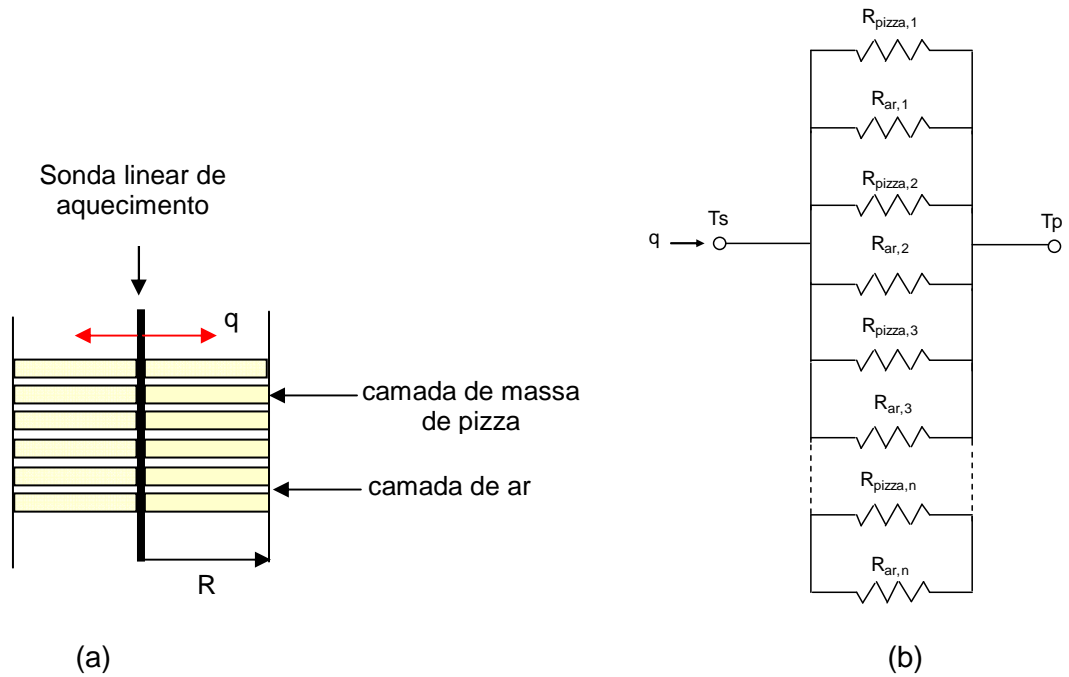


Figura 4.38 – (a) Esquema das camadas de massa de pizza, intercaladas com ar no interior do tubo, (b) associação em paralelo das resistências térmicas.

A resistência térmica equivalente para a massa da pizza e para as camadas de ar, supondo que tais camadas tenham a mesma espessura, são dadas por:

$$R_{eq,pizza} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_{pizza}} \frac{1}{R_{pizza,i}}} = \frac{R_{pizza}}{n_{pizza}} = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{n_{pizza} 2\pi k_{pizza} L_{pizza}} \quad (4.26)$$

$$R_{eq,ar} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_{ar}} \frac{1}{R_{ar,i}}} = \frac{R_{ar}}{n_{ar}} = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{n_{ar} 2\pi k_{ar} L_{ar}} \quad (4.27)$$

onde r_1 e r_2 são os raios correspondentes às medidas das temperaturas $T_{s,1}$ e $T_{s,2}$ que, para este caso, são as temperaturas da sonda, T_s , e da parede, T_p , respectivamente. L é o comprimento da camada, n é o número de camadas e k é a condutividade térmica, para a massa da pizza ou para o ar.

Para o completo preenchimento do tubo, foram necessárias 20 camadas de massa de pizza, conforme mostra a Figura 4.39 (a). Com um corte longitudinal dessas camadas foi medida a espessura das camadas de massa, aproximadamente 1 cm, e da camada de ar, aproximadamente 0,05 cm (Figura 4.39b).



Figura 4.39 – (a) Número de camadas de massa de pizza para o preenchimento do tubo, (b) corte longitudinal para determinação da espessura das camadas de ar.

Assim, aplicando-se os valores de $r_1=0,00078$ m e $r_2=0,026$ m e os valores das condutividades térmicas do ar, $k_{ar}=0,026$ W/m°C, e da massa de pizza, $k_{pizza}=0,092$ W/m°C, e $n_{pizza} = n_{ar} = 20$ nas Equações (4.26) e (4.27), tem-se:

$$R_{eq,pizza} = 30,3 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{eq,ar} = 2146,5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Nota-se que a resistência térmica oferecida pelas camadas de ar é cerca de 70 vezes superior à resistência térmica imposta pela massa de pizza. Com isso conclui-se que o ar presente entre as camadas de massa de pizza não influencia significativamente o fluxo de calor fornecido pela sonda linear de aquecimento. A resistência térmica devido à presença de ar entre as camadas de massa de pizza pode ser desprezada na Equação (4.25) e a resistência térmica à condução de calor pode ser considerada como aquela oferecida somente pela massa de pizza, ou seja, $R_{t,cond} \approx R_{eq,pizza}$.

Comparando-se as resistências térmicas à condução, dadas pela Equação (4.25), com e sem a presença das camadas de ar, o erro associado a essa consideração será:

$$\text{Erro}_{R_{eq}} (\%) = \frac{R_{eq,pizza} - R_{eq,pizza+ar}}{R_{eq,pizza+ar}} = 1,4 \quad (4.28)$$

4.4.2.3 Cálculo do número de Biot para a massa da pizza

Uma vez obtida a condutividade térmica da massa da pizza, juntamente com o coeficiente médio de transferência de calor por convecção, obtido no Capítulo IV, subitem 4.3.2, foi calculado no número de Biot para a massa da pizza pela Equação (3.47).

$$Bi = \frac{h_{\text{conv}} L_C}{K_{\text{pizza}}} = \frac{26,2 \times 0,013 / 2}{0,092} = 1,85$$

Sendo o valor do número de Biot superior a 1 para a massa da pizza, admite-se que a distribuição de calor não é uniforme através dela. A resistência à condução de calor no seu interior é maior que a resistência à convecção através da sua superfície. Assim, na simulação do processo de cocção real da pizza, deve-se levar em conta que a hipótese de capacitância global para a massa da pizza não é válida. Neste caso, deve-se resolver o problema de condução de calor transiente no meio.

4.5 ANÁLISE DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

A análise de incerteza para as grandezas relacionadas nesse trabalho é apresentada detalhadamente no Apêndice F.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

No presente trabalho foram determinadas as condições de cocção da pizza, avaliando-se a influência da convecção forçada, da radiação pelo teto e pelas paredes do forno, além do uso de forma de alumínio e de pedra sobre os parâmetros de qualidade da pizza.

Dentre esses fatores, a convecção forçada foi aquele que teve maior influência sobre todos os parâmetros de qualidade (cor, textura da borda, número de reduções decimais, perda de água) avaliados para a pizza. A radiação pelo teto e pelas paredes laterais e o material da forma não tiveram efeito significativo sobre a cor da pizza, sendo indiferente o nível escolhido para cada um desses fatores. Além da convecção, a radiação pelo teto e pelas paredes laterais do forno tiveram efeito positivo sobre a textura da borda e sobre a perda de água durante a cocção. Embora a interação desses dois fatores também sejam significativa sobre a textura da borda, observou-se que as configurações utilizando somente radiação pelo teto, somente radiação pelas paredes ou radiação proveniente das duas superfícies juntas não provocaram diferença significativa entre si nos valores de textura, para ambos os níveis de convecção forçada. Para o parâmetro de segurança microbiológica avaliado – o número de reduções decimais, todos os fatores apresentaram efeito positivo. O uso da forma de pedra proporcionou maiores números de redução decimal comparado ao uso da forma de alumínio. Assim, chegou-se a conclusão de que a melhor configuração do forno a ser adotada foi: convecção forçada, radiação pelo teto e pelas paredes laterais do forno e utilização de forma de pedra.

A avaliação das melhores condições de operação do forno, na qual diferentes níveis de temperatura, tempo e velocidade do ventilador foram estudadas, somente duas atenderam os critérios estabelecidos para a qualidade da pizza: aquelas assadas em forno a 250°C, com ventilador operando com uma frequência de 5Hz, durante 10 minutos e aquelas assadas em forno a 250°C, com ventilador a 20Hz, durante 5 minutos. Por conveniência e economia, foi adotada a condição de operação com menor tempo de cocção para a caracterização das condições térmicas do processo de cocção da pizza.

A caracterização térmica do forno foi feita determinando-se os coeficientes de transferência de calor por convecção, condução e radiação. O coeficiente médio de transferência de calor por convecção foi obtido pelo método da capacitância global. Os coeficientes médios modificados de transferência de calor por radiação e condução foram

determinados também por este método e utilizando-se a técnica dos blocos, proposta neste trabalho. Os resultados mostraram que o mecanismo de transferência de calor predominante na cocção da pizza foi a radiação, seguida da convecção e da condução. Os valores médios para o coeficiente de troca térmica por radiação calculados com a temperatura média das superfícies foram aproximadamente 50% menores que aqueles calculados pela técnica dos blocos. A técnica dos blocos para o cálculo da parcela de calor transferida ao bloco por radiação parece ser a mais indicada, pois, enquanto o uso da temperatura média das superfícies não leva em conta a contribuição das regiões mais quentes para a radiação, o bloco preto absorve toda a energia que nele chega, considerando inclusive o calor emitido em maior ou menor intensidade por tais regiões. A condução, por sua vez, foi o mecanismo de menor influência durante o processo de cocção de pizza. Isto se deve, provavelmente, ao baixo contato entre a forma e o bloco, caracterizando uma alta resistência térmica de contato entre eles.

Em relação às propriedades termofísicas da massa da pizza, determinadas sob a configuração e condições de operação do forno propostas anteriormente, a difusividade térmica teve um valor médio de $2,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para as massas assada até o terceiro minuto e um valor médio de $3,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para as assadas entre o terceiro e quinto minuto. Para a condutividade térmica, o valor médio obtido foi de $0,092 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ para as massas assadas em até 5 minutos.

A análise sensorial via correio eletrônico realizada com uso da escala padrão de cor, desenvolvida especialmente para este estudo, foi uma alternativa à análise sensorial presencial, facilitando o estudo devido à possibilidade de se ter maior número de julgadores avaliando uma determinada amostra e com isso, obter respostas mais confiáveis em menos tempo.

A obtenção da temperatura no interior da massa da pizza, para o cálculo do número de reduções decimais, apresentou algumas dificuldades. O termopar foi inserido na massa enquanto essa estava fora do forno. Muitas vezes, ao se colocar a pizza dentro do forno e fechar a porta deste, o termopar se deslocava e a temperatura não podia ser obtida, tendo-se que anular o teste. Recomenda-se que seja utilizada uma estrutura rígida suportando o termopar que será inserido na amostra, especialmente quando a amostra for um produto panificável, pois, esses produtos tendem a se expandir e nesta fase a massa fica mais suscetível a se romper.

Recomenda-se, ainda, o desenvolvimento de uma forno de pizzas assistido por termossifões com uso de gás natural, utilizando as configurações e as condições de operação do forno aqui propostas, com os ajustes que se fizerem necessários. A tecnologia de termossifões vem sendo empregada com sucesso pelo LABTUCAL em fornos de

panificação, sendo uma alternativa mais econômica e com menor impacto ambiental aos fornos que usam energia elétrica ou queima de madeira.

Em relação à caracterização térmica de cavidades, recomenda-se que as superfícies aquecidas sejam instrumentadas com maior quantidade de termopares, a fim de se obter valores para o coeficiente de radiação (calculados usando a temperatura das superfícies) mais confiáveis. Recomenda-se, ainda, o isolamento térmico de todas as superfícies externas da cavidade, incluindo a porta, minimizando, assim, a perda de calor para o ambiente.

Para a determinação da condutividade térmica da massa de pizza foi utilizado o método da sonda linear de aquecimento e, durante a calibração com glicerina P.A foi assumida a hipótese de que a transferência de calor por convecção entre a glicerina e a sonda é desprezível. Recomenda-se, no entanto, fazer um estudo para verificar a validade dessa hipótese ou utilizar algum gel como material de calibração, na tentativa de se eliminar completamente a possível contribuição na transferência de calor por parte da convecção.

Ainda, em relação às propriedades termofísicas de alimentos, sugere-se para trabalhos futuros que se conheça a composição do alimento, de forma que se possam comparar resultados obtidos por outros autores, utilizando a mesma técnica de medição aqui empregada ou diferentes técnicas para a determinação dessas propriedades.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGILENT TECHNOLOGIES INC. **BenchLink data logger software**. Disponível em: <http://www.home.agilent.com>. Acesso em: setembro, 2008.

AKTERIAN, S.G. Control strategy using functions of sensitivity for thermal processing of sausages. **Journal of Food Engineering**, v. 31, p. 449-455,1997.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Control of Communicable Diseases Manual**. 16 ed. Washington DC: Abram S. Benenson Editor, 1996. 577p.

AMORIM, Diogo. **Validação do processamento térmico de calzone**. 2008. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GASTRONOMIA, HOSPITALIDADE E TURISMO. **ABRESI-Eventos**: Os números da pizza em São Paulo. Disponível em: <http://www.abresi.com.br>. Acesso em: abril, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12806**: Análise sensorial dos alimentos e bebidas. Rio de Janeiro, 1993. 8 p.

_____. **NBR 12994**: Métodos de análise sensorial dos alimentos e bebidas. Rio de Janeiro, 1993. 2 p.

_____. **NBR 13170**: Teste de ordenação em análise sensorial. Rio de Janeiro, 1994. 7 p.

_____. **NBR 14141**: Escalas utilizadas em análise sensorial de alimentos e bebidas. Rio de Janeiro, 1998. 3 p.

_____. **NBR 6023**: Informação e documentação: referência – elaboração. Rio de Janeiro, 2002. 24 p.

AUDIDIER, Y. Effects of thermal kinetics and weight loss kinetics on biochemical reactions in dough. **Bakers Digest**, v. 42, p. 36-38, 1968.

BAIK, O. D.; MARCOTTE, M.; CASTAIGNE, F. Cake baking in tunnel type multi-zone industrial ovens Part I. Characterization of baking conditions. **Food Research International**, v. 33, n. 7, p. 587-598, 2000. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09639969>. Acesso em: novembro, 2007.

_____. Cake baking in tunnel type multi-zone industrial ovens Part II. Evaluation of quality parameters. **Food Research International**, v. 33, n. 7, p. 599-607, 2000. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09639969>. Acesso em: novembro, 2007.

BAIK, O. D.; MARCOTTE, M.; SABLANI, S. S.; CASTAIGNE, F. Thermal and Physical Properties of Bakery Products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 41, n. 5, p. 321-352, 2001. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/10408398>. Acesso em: novembro, 2007.

BARBETTA, Pedro Alberto. **Construção de modelos para médias e variâncias na otimização experimental de produtos e processos**. 1998. 246f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BLUME, S.I.; MILECH, C.; RIBEIRO, G.A. **Pizzas mussarela um risco à saúde do consumidor?** In: Congresso de Iniciação Científica, XIV, 2005, Pelotas/RS. Anais do XIV Congresso de Iniciação Científica: Universidade Federal de Pelotas/RS, 2005.

CARBONERA, Leonardo; CARCIOFI, Bruno A.M.; HUBER, Eduardo; LAURINDO, João B. Determination of thermal diffusivity of mortadella using actual cooking process data. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 6, n. 2, p. 285-290, 2003. Disponível em: <http://www.ital.sp.gov.br/bj/artigos/brazilianjournal/free/p03143.pdf>. Acesso em: abril, 2008.

CARCIOFI, B.A.M.; FAISTEL, J.; ARAGÃO, G.M.F.; LAURINDO, J.B. Determination of thermal diffusivity of mortadella using actual cooking process data. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 1, p. 89-94, 2002. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: abril, 2008.

CARDELLO, A. V. Food quality: Relativity, context and consumer expectations. **Food Quality and Preference**, v. 6, n. 3, p. 163-170, 1995. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09503293>. Acesso em: novembro, 2007.

CARSLAW, H.S.; JAEGER, J.C. **Conduction of Heat in Solids**. 2 ed. London: Oxford University Press, 1959. 510 p.

CAYOT, N. Sensory quality of traditional foods. **Food Chemistry**, v. 101, n. 1, p. 154-162, 2007. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03088146>. Acesso em: janeiro, 2008.

CIENFUEGOS, Freddy. **Estatística aplicada ao laboratório**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2005. 200p.

CHIAVARO, E.; BARBANTI, D.; VITTADINI, E.; MASSINI, R. The effect of different cooking methods on the instrumental quality of potatoes (cv. Agata). **Journal of Food Engineering**, v. 77, n.1, p. 169-178, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: janeiro, 2008.

COSTELL, E. A comparison of sensory methods in quality control. **Food Quality and Preference**, v.13, n. 6, p. 341-353, 2002. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09503293>. Acesso em: dezembro, 2007.

CRUZ, Rafael Eduardo. **Uma avaliação das distribuições de temperatura e dos mecanismos de troca térmica em uma câmara de combustão**. 2006. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CUQ, B.; ABECASSIS, J.; GUILBERT, S. State diagrams to help describe wheat bread processing. **International Journal of Food Science & Technology**, v.38, p. 759-766, 2003.

DE BONIS, M.V.; RUOCCO, G. Modelling local heat and mass transfer in food slabs due to air jet impingement. **Journal of Food Engineering**, v.78, n. 1, p.230-237, 2007. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: janeiro, 2008.

DEPARTMENT OF HEALTH AND AGEING. Australian Government. OzFoodNet: enhancing foodborne disease surveillance across Australia: Quarterly report, January to March 2004. **Communicable Diseases Intelligence**, v. 28 , n. 2, 2004. Disponível em: <http://www.health.gov.au/internet/main/Publishing.nsf/Content/cda-pubs-cdi-2004-cdi2802-htm-cdi2802i.htm>. Acesso em: junho, 2008.

DICKERSON, Roger W. Jr. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**, p. 198-204, 1965.

EES. **Engineering Equation Solver**. Disponível em: <http://www.mhhe.com/engcs/mech/ees/> Acesso em: janeiro, 2008.

ELUSTONDO, D.; ELUSTONDO, M. P.; URBICAIN, M. J. New thermal conductivity probe design based on the analysis of error sources **Journal of Food Engineering**, v. 48, n.4, p. 325-333, 2001. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: abril, 2008.

FAHLOUL, D.; TRYSTRAM, G.; McFARLANE, I.; DUQUENOY, A. Measurements and predictive modeling of heat fluxes in continuous baking oven. **Journal of Food Engineering**, v. 26, n. 4, p.469-479, 1995. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: janeiro, 2007.

FELLOWS, Peter. **Food processing technology: principles and practice**. Chichester: Ellis Horwood; Weinheim: VCH, 1988. 505p.

FRANCIS, J. Quality as influenced by color. **Journal of Food Quality and Preference**, v.6, n.3, p. 149-155. 1995. Disponível: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09503293>. Acesso em: abril, 2007.

FREITAS, W. C. de; SOUZA, E. L. de; SOUSA, C. P. de; TRAVASSOS, A. E. R. Ocorrência de *Staphylococcus* em massa refrigerada tipo pizza pronta. **Revista Higiene Alimentar**, v. 18, n. 122, p. 67-70, 2004.

FRYER, P. J.; ROBBINS, P. T. Heat transfer in food processing: ensuring product quality and safety. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, n. 16, p. 2499-2510, 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/13594311>. Acesso em: dezembro, 2007.

GAVA, Altanir Jaime. **Princípios de tecnologia de alimentos**. Rio de Janeiro: Nobel, 2002. 284p.

GENERAL MILLS. **News Releases: Totino's and Jeni's frozen pizzas recalled due to possible *E. coli* contamination**, 2007. Disponível em: http://www.generalmills.com/corporate/media_center/news_release_detail.aspx?itemID=29007&catID=227. Acesso em: junho, 2008.

GIOVANELLI, G., PERI, C., BORRI, V. Effects of baking temperature on crumb-staling kinetics. **Cereal Chemistry**, v. 74, p. 710-714, 1997.

GLAVINA, M.Y.; DI SCALA, K.C.; ANSORENA, R.; DEL VALLE, C.E. Estimation of thermal diffusivity of foods using transfer functions. **LWT – Food Science and Technology**, v. 39, n. 5, p. 455-459, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00236438>. Acesso em: abril, 2008.

HADIYANTO, A.;ESVELD, D.C; BOOM, R.M.; VAN STRATEN, G.; VAN BOXTEL, A.J.B. Quality prediction of bakery products in the initial phase of process design. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 8, n. 2, p.285-298, 2007. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: abril,2008.

_____. Product quality driven design of bakery operations using dynamic optimization **Journal of Food Engineering**, v. 86, n. 3, p. 399-413, 2008. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: abril,2008.

HOLDSWORTH, S. D. Optimisation of thermal processing — A review **Journal of Food Engineering**, v.4, n. 2, p. 89-116, 1985. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: setembro, 2007.

Holman, J. P. **Experimental methods for engineers**. 18 ed. New York: McGraw-Hill (McGraw-Hill series in mechanical engineering),1994. 616 p.

INSTITUTO ADOLF LUTZ (IAL). **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. v. 1: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos**, 4 ed. Brasília: Eitora MS, 2005. p. 98.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 4 ed. São Paulo: LTC, 1998. 494p.

JEFFERSON, D.R.; LACEY, A.A.; SADD, P.A. Understanding crust formation during baking. **Journal of Food Engineering**, v. 75, n. 4, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: janeiro, 2007.

JORNAL DA UNICAMP. **Preparo de pizza em fôrma de ferro é objeto de estudo**. Disponível: http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/agosto2004/ju260pag8b.html. Acesso em: setembro de 2007.

KNISS, Cláudia Terezinha. **Desenvolvimento e caracterização de materiais cerâmicos com adição de cinzas pesadas de carvão mineral**. 2005. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

KOSTAROPOULOS, A.E.; SARAVACOS, G.D. Thermal diffusivity of granular and porous foods at low moisture content. **Journal of Food Engineering**, v.33, p.101-109, 1997. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: maio, 2007.

MARCOTTE, M.; TAHERIAN, A.; KARIMI, Y. Thermophysical properties of processed meat and poultry products. **Journal of Food Engineering**, v. 88, n.3, p. 315-322, 2008. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: junho, 2008.

MILANEZ, Fernando H.; MANTELLI, Marcia B.H. Thermal characteristics of a thermosyphon heated enclosure. **International Journal of Thermal Sciences**, v.45, n.5, p. 504-510, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/12900729>. Acesso em: janeiro, 2008.

MINITAB INC. (2007). **Minitab® 15 Statistical Software**. Disponível em: <http://www.minitab.com>. Acesso em: setembro, 2007.

MOLNÁR, P. J. A model for overall description of food quality **Food Quality and Preference**, v. 6, n. 3, p. 185-190, 1995. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09503293>. Acesso em: abril, 2007.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. 5 ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 649p.

MONTGOMERY, Douglas C; RUNGER, George; HUBELE, Norma Faris. **Estatística aplicada à engenharia**. Tradução: Verônica Cadado, D.Sc. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 335p.

MOSEHNIN, Nuri N. **Thermal Properties of Food and Agricultural Materials - Part II. Thermal Conductivity, Diffusivity, Unit Surface Conductance, Coefficient of Thermal Expansion and Applications**. prelim.ed. Pennsylvania: Pennsylvania University, 1978. v. 5. 366p.

MURAKAMI, E.G.; SWEAT, V. E.; SASTRY, S. K.; KOLBE, E. Analysis of various design and operating parameters of the thermal conductivity probe **Journal of Food Engineering**, v. 30, n. 1-2, p. 209-225, 1996. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: fevereiro, 2008.

MURAKAMI, E.G.; SWEAT, V. E.; SASTRY, S. K.; KOLBE, E.; HAYAKAWA, K.; DATTA, A. Recommended design parameters for thermal conductivity probes for nonfrozen food materials. **Journal of Food Engineering**, v. 27, n. 2, p. 109-123, 1994. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: fevereiro, 2008.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **LabVIEW: software de aquisição de dados**. Disponível em: <http://www.ni.com/labview86/>. Acesso em: setembro, 2008.

OLSSON, E.E.M.; THAGHARDH, A.C.; AHRNÉ, L.M. Effect of near-infrared radiation and jet impingement heat transfer on crust formation of bread. **Journal of Food Science**, v.70, n.8, 2005.

PATEL, B.K.; WANISKA, R.D.; SEETHARAMAN, K. Impact of different baking processes on bread firmness and starch properties in breadcrumb. **Journal of Cereal Science**, v. 42, p.173-184, 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/07335210>. Acesso em: março, 2008.

PERRY, Robert H.; GREEN, Don W. **Perry's chemical engineers' handbook**. 7ed. EUA: MacGraw, 1997.

PINHO, B.H. da S.; MACHADO, M. I. F.; FURLONG, E. B. Propriedades físico-químicas das massas de pizza semi-prontas e sua relação com o desenvolvimento de bolores e leveduras. **Revista Instituto Adolfo Lutz**, v. 60, n. 1, p. 35-41, 2001

QUAGLIA, Giovanni. **Ciencia y tecnología de la panificación**. Tradução de B. Mateos-Nevado, D. Mateos-Nevado Alonso. 2. ed. Zaragoza: Editorial Acribia, S.A., 1991. 485 p.

QUAROONI, Jalal. **Flat bread technology**. EUA: Springer, 1996. 206 p.

QUEIROZ, Gilmar Michel. **Determinação de propriedades termofísicas do pão francês durante o processo de assamento**. 2001. 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo.

SABLANI, S. S.; BAIK, O.; MARCOTTE, M. Neural networks for predicting thermal conductivity of bakery products. **Journal of Food Engineering**, v. 52, n.3, p. 299-304, 2002. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: março, 2008.

SATO, Hidemi; MATSUMURA, Tsuneo; SHIBUKAWA, Shoko. Apparent heat transfer in a forced convection oven and properties of baked food. **Journal of Food Science**, v.52, n.1, p. 185-189, 1987.

SAXENA, D.C.; HARIDAS, Rao; RAO, K.S.M.S. Raghava. Analysis of modes of heat transfer in tandoor oven. **Journal of Food Engineering**, v.26, n. 2, p. 209-217, 1995. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: setembro, 2007.

SECRETARIA DO ESTADO DE SAÚDE DE SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. Notícias: Pizzarias são as campeãs da falta de higiene em SP, 2008. Disponível em: <http://portal.saude.sp.gov.br/content/drispufrus.mmp>. Acesso em: outubro, 2008.

SENAI, Convenio CNI/SENAI/SEBRAE. **Elementos de apoio para o Sistema APPCC**. Brasília, SENAI/DN, 1999. 371p. (Série Qualidade e Segurança Alimentar).

SIEGEL, Robert; HOWELL, John R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. 3 ed. Washington DC: Taylor & Francis, 1992. 1072p.

SILVA, Alexandre K. da. **Otimização de fornos de cocção de pães assistidos por termossifões**. 2001. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SOMMIER, A.; CHIRON, H.; COLONNA P.; VALLE, G.D.; ROUILLE, J. An instrumented pilot scale oven for the study of French bread baking. **Journal of Food Engineering**, v. 69, n. 1,

97-106, 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: setembro, 2007.

SUMNU, G.; DEMIREKLER, P.; SAHIN, S. Optimization of bread baking in a halogen lamp-microwave combination oven by response surface methodology. **Eur Food Res Technol**, v.219, n.4, p. 341-347, 2004. Disponível em: <http://www.springerlink.com/content/4ppan6uw90k3m4c7>. Acesso em: novembro, 2007.

SWEAT, Vincent E. **Thermal properties of foods**. In: RAO, M.A.; RIZVI, S.S.H. Engineering Properties of Foods. 2 ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 1994. p. 99-138.

TAVMAN, Sebnem; KUMCUOGLU, Seher. Thermal properties of pizza dough at different temperatures. **The 5 th International Conference on Food Physics ISFP**, 2002. p. 116-119, 2002.

TEIXEIRA, Evanilda; MEINERT, Elza Maria; BARBETTA, Pedro Alberto. **Análise sensorial de alimentos**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1987. 180p.

TEÓFILO, Reinaldo F.; FERREIRA, Márcia M. C. Quimiometria II: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. **Química Nova**, v. 29, n. 2, p. 338-350, 2006. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/qn/qnol/2006/vol29n2/>. Acesso em: março, 2007.

THERDTHAI, N.; ZHOU, W.; ADAMCZAK, T. Optimisation of the temperature profile in bread baking. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 1, p. 41-48, 2002. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: abril, de 2008.

THORVALDSSON, Karin, et al. Rheology and structure of heat-treated pasta dough: Influence of water content and heating rate. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 32, n.3, p. 154-161, 1999. Disponível em: http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/622910. Acesso em: março, 2008.

THORVALDSSON, Karin; SKJÖLDEBRAND, Christina. Water diffusion in bread during baking. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 31, n.7-8, p. 658-663, 1998. Disponível em: http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/622910. Acesso em: março, 2008.

TRIÂNGULOMINEIRO.COM. Vigilância encontra contaminação em pizzas semi-prontas. Fonte: da redação, 07/10/2003. Disponível em: <http://www.triangulomineiro.com/noticia.aspx?catnot=57&id=3313&nomecatnot=sa%c3%bad> e. Acesso em: junho, 2008.

VERBSOVEN, P.; SCHEERLINCK, N.; DE BAERDEMAEKER, J.; NICOLAÏ, B.M. Sensitivity of the food centre temperature with respect to the air velocity and the turbulence kinetic energy. **Journal of Food Engineering**, v. 48, n. 1, p.53-60, 2001. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: maio, 2008.

VOUDOURIS, N.; HAYAKAWA, K. Simultaneous determination of thermal conductivity and diffusivity of foods using a point heat source probe: a theoretical analysis. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v.27, n.6, p. 522-532, 1994. Disponível em: http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/622910. Acesso em: janeiro, 2008.

WÄHLBY, U.; SKJÖLDEBRAND, C.; JUNKER, E. Impact of impingement on cooking time and food quality. **Journal of Food Engineering**, v. 43, n. 3, p.179-187, 2000. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: janeiro, 2008.

WANG, Sin Huei, et al. Farinhas de trigo e soja pré-cozidas por extrusão para massas de pizza. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.4, p.389-395, 2005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2005000400011. Acesso em: maio de 2008.

XUE, J.; WALKER, C.E. Humidity change and its effects on baking in an electrically heated air jet impingement oven. **Food Research International**, v. 36, p.561-569, 2003. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09639969>. Acesso em: março, 2008.

YONG, Y.P.; EMERY, A.N.; FRYER, P.J. Heat transfer to a model dough product during mixed regime thermal processing. **Food and Bioprocess Processing**, v. 80, n. 3, p. 183-192, 2002. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09603085>. Acesso em: abril, 2008.

ZANONI, B.; PERI, C.; GIANOTTI, R. Determination of the thermal diffusivity of bread as a function of porosity. **Journal of Food Engineering**, v. 26, n. 4, p. 497-510, 1995. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: fevereiro, 2008.

ZANONI, B.; SMALDONE, D.; SCHIRALDI, A. Starch gelatinization in chemically leavened bread baking. **Journal of Food Science**, v.56, n.6, p. 1702-1706, 1991.

ZAREIFARD, M.R.; MARCOTTE, M.; DOSTIE, M. A method for balancing heat fluxes validated for a newly designed pilot plant oven. **Journal of Food Engineering**, v. 76, n.3, p.303-312, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: dezembro, 2007.

ZHANG, J.; DATTA, A.K. Mathematical modeling of bread baking process **Journal of Food Engineering**, v. 75, n. 1, p. 78-89, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02608774>. Acesso em: abril, 2007.

ANEXO – A

Tabela ANEXO 1 – Amplitude estudentizada, em função do número de tratamentos (a) e do número de grau de liberdade do resíduo (gl_E), ao nível α de probabilidade de 5%.

VIII. Percentage Points of the Studentized Range Statistic (continued)

		$q_{.05}(p, f)$																	
		p																	
f	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	18.1	26.7	32.8	37.2	40.5	43.1	45.4	47.3	49.1	50.6	51.9	53.2	54.3	55.4	56.3	57.2	58.0	58.8	59.6
2	6.09	8.28	9.80	10.89	11.73	12.43	13.03	13.54	13.99	14.39	14.75	15.08	15.38	15.65	15.91	16.14	16.36	16.57	16.77
3	4.50	5.88	6.83	7.51	8.04	8.47	8.85	9.18	9.46	9.72	9.95	10.16	10.35	10.52	10.69	10.84	10.98	11.12	11.24
4	3.93	5.00	5.76	6.31	6.73	7.06	7.35	7.60	7.83	8.03	8.21	8.37	8.52	8.67	8.80	8.92	9.03	9.14	9.24
5	3.64	4.60	5.22	5.67	6.03	6.33	6.58	6.80	6.99	7.17	7.32	7.47	7.60	7.72	7.83	7.93	8.03	8.12	8.21
6	3.46	4.34	4.90	5.31	5.63	5.89	6.12	6.32	6.49	6.65	6.79	6.92	7.04	7.14	7.24	7.34	7.43	7.51	7.59
7	3.34	4.16	4.68	5.06	5.35	5.59	5.80	5.99	6.15	6.29	6.42	6.54	6.65	6.75	6.84	6.93	7.01	7.08	7.16
8	3.26	4.04	4.53	4.89	5.17	5.40	5.60	5.77	5.92	6.05	6.18	6.29	6.39	6.48	6.57	6.65	6.73	6.80	6.87
9	3.20	3.95	4.42	4.76	5.02	5.24	5.43	5.60	5.74	5.87	5.98	6.09	6.19	6.28	6.36	6.44	6.51	6.58	6.65
10	3.15	3.88	4.33	4.66	4.91	5.12	5.30	5.46	5.60	5.72	5.83	5.93	6.03	6.12	6.20	6.27	6.34	6.41	6.47
11	3.11	3.82	4.26	4.58	4.82	5.03	5.20	5.35	5.49	5.61	5.71	5.81	5.90	5.98	6.06	6.14	6.20	6.27	6.33
12	3.08	3.77	4.20	4.51	4.75	4.95	5.12	5.27	5.40	5.51	5.61	5.71	5.80	5.88	5.95	6.02	6.09	6.15	6.21
13	3.06	3.73	4.15	4.46	4.69	4.88	5.05	5.19	5.32	5.43	5.53	5.63	5.71	5.79	5.86	5.93	6.00	6.06	6.11
14	3.03	3.70	4.11	4.41	4.64	4.83	4.99	5.13	5.25	5.36	5.46	5.56	5.64	5.72	5.79	5.86	5.92	5.98	6.03
15	3.01	3.67	4.08	4.37	4.59	4.78	4.94	5.08	5.20	5.31	5.40	5.49	5.57	5.65	5.72	5.79	5.85	5.91	5.96
16	3.00	3.65	4.05	4.34	4.56	4.74	4.90	5.03	5.15	5.26	5.35	5.44	5.52	5.59	5.66	5.73	5.79	5.84	5.90
17	2.98	3.62	4.02	4.31	4.52	4.70	4.86	4.99	5.11	5.21	5.31	5.39	5.47	5.55	5.61	5.68	5.74	5.79	5.84
18	2.97	3.61	4.00	4.28	4.49	4.67	4.83	4.96	5.07	5.17	5.27	5.35	5.43	5.50	5.57	5.63	5.69	5.74	5.79
19	2.96	3.59	3.98	4.26	4.47	4.64	4.79	4.92	5.04	5.14	5.23	5.32	5.39	5.46	5.53	5.59	5.65	5.70	5.75
20	2.95	3.58	3.96	4.24	4.45	4.62	4.77	4.90	5.01	5.11	5.20	5.28	5.36	5.43	5.50	5.56	5.61	5.66	5.71
24	2.92	3.53	3.90	4.17	4.37	4.54	4.68	4.81	4.92	5.01	5.10	5.18	5.25	5.32	5.38	5.44	5.50	5.55	5.59
30	2.89	3.48	3.84	4.11	4.30	4.46	4.60	4.72	4.83	4.92	5.00	5.08	5.15	5.21	5.27	5.33	5.38	5.43	5.48
40	2.86	3.44	3.79	4.04	4.23	4.39	4.52	4.63	4.74	4.82	4.90	4.98	5.05	5.11	5.17	5.22	5.27	5.32	5.36
60	2.83	3.40	3.74	3.98	4.16	4.31	4.44	4.55	4.65	4.73	4.81	4.88	4.94	5.00	5.06	5.11	5.15	5.20	5.24
120	2.80	3.36	3.69	3.92	4.10	4.24	4.36	4.47	4.56	4.64	4.71	4.78	4.84	4.90	4.95	5.00	5.04	5.09	5.13
∞	2.77	3.32	3.63	3.86	4.03	4.17	4.29	4.39	4.47	4.55	4.62	4.68	4.74	4.80	4.84	4.89	4.93	4.97	5.01

APÊNDICES

A – Planejamento experimental e análise estatística

B – Disposição dos termopares no interior do forno.

C – Determinação dos fatores de forma entre as superfícies internas do forno e a pizza.

D – Determinação das condições de cocção da pizza.

E - Determinação das condições térmicas de cocção da pizza.

F – Determinação das propriedades térmicas da pizza

G – Análise de incertezas

APÊNDICE – A

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

As etapas para a realização deste estudo, apresentadas no capítulo seguinte, são precedidas, em sua maioria, de planejamentos experimentais e em seguida, os dados obtidos, submetidos a análises estatísticas que auxiliarão nas conclusões e tomadas de decisões. Assim, no decorrer deste trabalho utilizar-se-ão inúmeros conceitos da área de estatística, motivo pelo qual, será apresentado no Apêndice A uma revisão bibliográfica englobando estes conceitos. Um experimento planejado consiste de uma série de testes, nos quais são feitas alterações planejadas nas variáveis de entrada ou fatores¹ do processo, permitindo observar e identificar os efeitos das mudanças na variável de saída (resposta). (BARBETTA, 1998). Além de determinar quais variáveis que mais influenciam na resposta, o experimento tem como objetivo determinar como o conjunto de fatores deve ser ajustado, de modo que a resposta esteja quase sempre próxima do valor nominal desejado. (MONTGOMERY, 2001).

Muitas vezes em um processo, diversos fatores podem influenciar a resposta desejada. Além da influência isolada de cada fator (efeito principal), pode ocorrer a interação entre eles. Denomina-se efeito principal de um fator, a diferença provocada na resposta quando este fator muda do nível mais baixo para o nível mais alto. No caso em que apenas dois níveis de um fator são estudados, o nível mais baixo é representado por um sinal negativo (-) e o nível mais alto, por um sinal positivo (+). Por sua vez, a interação entre fatores ocorre quando a diferença na resposta entre os níveis de um fator não é a mesma para todos os níveis do outro fator. Esta interação pode ser de ordem igual ou superior a dois, conforme o número de fatores envolvidos. (BARBETTA, 1998). Através de um planejamento experimental é possível determinar quais fatores e interações têm influência significativa sobre as respostas de interesse. Com o objetivo de determinar estes fatores, pode-se, ainda, planejar o experimento de forma a estimar a magnitude e a direção dos efeitos desses fatores. Os experimentos estatisticamente planejados permitem eficiência e economia no processo experimental e o uso de métodos estatísticos no exame de dados resulta na objetividade científica quando da obtenção de conclusões. (MONTGOMERY, 2001).

¹ Os fatores do processo podem ser quantitativos e/ou qualitativos.

Experimentos planejados são geralmente empregados seqüencialmente. Numa primeira etapa, o experimento envolvendo um sistema complexo de muitos fatores controláveis é frequentemente um experimento de seleção ou exploratório (*screening experiment*), projetado para determinar quais fatores afetam mais significativamente a resposta. Nessa etapa, os fatores que não tiverem influência nas respostas devem ser fixados durante todo o experimento, de modo a conduzi-lo de forma mais prática e com menor custo. Experimentos subseqüentes são usados para refinar as informações obtidas no planejamento de seleção e determinar a região dos fatores importantes que conduz a uma resposta ótima. (TEÓFILO; FERREIRA, 2006; MONTGOMERY, 2001).

Na fase inicial da investigação, onde o número de fatores pode ser bastante grande, torna-se inviável a realização de um planejamento fatorial completo, onde todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigadas. Nesses casos, é recomendado iniciar a pesquisa com fatores em apenas dois níveis e com planejamentos fatoriais fracionados, cujo número de experimentos é bem menor. Estes planejamentos são denotados por 2^{k-p} , onde k é o número de fatores e p é o número de meias frações do planejamento 2^k . Para gerar um planejamento fracionado deve-se escrever um planejamento básico para $k-p$ fatores e então adicionar p colunas para os demais fatores. Os sinais das p colunas referentes a estes fatores serão encontradas através da multiplicação de cada fator pela relação de definição; a relação resultante desta multiplicação é chamada de gerador do planejamento. A relação de definição é usualmente escolhida como combinações de fatores do planejamento completo cuja coluna de sinais é igual à coluna identidade, e é denominada como $I = ABCD$ e $I = BCD$, por exemplo.

Um exemplo de uma coluna de sinais para um planejamento fatorial completo 2^3 , e para um planejamento fatorial fracionado 2^{4-1} , com relação de definição $I=ABCD$, é apresentado na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Exemplo de um planejamento fatorial completo 2^3 e de um planejamento fatorial fracionado 2^{4-1} , com $I=ABCD$.

<i>Combinação dos fatores (2^3)</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>Combinação dos fatores (2^{4-1})</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D=ABC</i>
(1)	-	-	-	(1)	-	-	-	-
<i>a</i>	+	-	-	<i>ad</i>	+	-	-	+
<i>b</i>	-	+	-	<i>bd</i>	-	+	-	+
<i>ab</i>	+	+	-	<i>ab</i>	+	+	-	-
<i>c</i>	-	-	+	<i>cd</i>	-	-	+	+
<i>ac</i>	+	-	+	<i>ac</i>	+	-	+	-
<i>bc</i>	-	+	+	<i>bc</i>	-	+	+	-
<i>abc</i>	+	+	+	<i>abcd</i>	+	+	+	+

Na combinação dos fatores, primeira coluna de cada tabela, denota-se em letra minúscula apenas aqueles fatores que estão sendo testados em seus níveis mais altos. O gerador do planejamento fatorial fracionado é $D=ABC$.

Outra característica de planejamentos fracionados é o fato dos efeitos dos fatores se confundirem uns com os outros. Por exemplo, $\text{efeito}_A = \text{efeito}_{BCD}$; $\text{efeito}_B = \text{efeito}_{ACD}$ ou, ainda, $\text{efeito}_D = \text{efeito}_{ABC}$. Este “confundimento” entre os efeitos é chamado de aliases ou pares associados, e quando isto acontece não é possível estimar cada efeito separadamente. Os pares associados são, também, obtidos através da multiplicação de cada fator pela relação completa de definição.

Sempre que possível, no uso de planejamentos fatoriais fracionados, procura-se trabalhar de forma a não produzir confundimento entre os efeitos de cada fator isoladamente (efeitos principais) e de interações de segunda ordem. (BARBETTA, 1998). Este confundimento pode ser evitado com a escolha da resolução do planejamento fatorial fracionado. Diz-se que planejamento fracionado 2^{k-p} é de resolução R se o efeito dos p fatores não está associado a nenhum outro efeito contendo menos que R-p fatores. A resolução está associada à complexidade da estrutura de confundimento entre os efeitos, sendo que quanto maior a resolução, menor a complexidade da estrutura de confundimento. Usualmente emprega-se numeral romano para denotar a resolução de um planejamento fatorial e, geralmente, para planejamentos de dois níveis é igual ao menor número de letras da relação de definição. Planejamentos de resolução IV são os mais particularmente úteis em experimentos de seleção de fatores, pois fornecem boas informações acerca dos efeitos principais e alguma informação sobre as interações de segunda ordem. (TEÓFILO; FERREIRA, 2006; MONTGOMERY, 2001).

Através de um cuidadoso planejamento e da análise dos dados experimentais, pode-se relacionar uma resposta, ou variável de saída, aos níveis de um número de variáveis de entrada que a afetam e também encontrar a combinação dos níveis dos fatores que conduzem a resposta especificada. Em geral, a variável resposta de interesse observada é y, e é função de variáveis independentes x_1, x_2, \dots, x_k e a relação entre essas variáveis pode ser escrita através do modelo empírico apropriado f, representado na Equação (A.1). Isso é feito através da análise de regressão. O termo ε representa o erro ou ruído observado na resposta y. Geralmente, a função f é um polinômio de primeira ou segunda ordem. (KNISS, 2005; MONTGOMERY, 2001).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (\text{A.1})$$

A etapa de uma investigação das propriedades de interesse inicia-se com a escolha de um ou mais modelos para descrever as propriedades de interesse em função

das variáveis independentes. O ajuste do modelo aos resultados é avaliado e comparado com os resultados de modelagens alternativas. O modelo escolhido determina quais são as combinações dos níveis dos fatores mais adequadas, do ponto de vista estatístico, para obtenção de estimativas de seus parâmetros. Os parâmetros desconhecidos ou coeficientes no modelo são estimados pelo método dos mínimos quadrados. (KNIESS, 2005).

Em geral, a variável dependente ou de resposta, y , pode estar relacionada a k variáveis independentes. Se a resposta for bem modelada por uma função linear das variáveis independentes (variáveis aleatórias contínuas), então a função de aproximação será o modelo de regressão linear múltipla, também chamado de modelo de primeira ordem. Se houver curvatura no sistema, então um polinômio de maior grau tem de ser usado, tal como o modelo quadrático ou modelo de segunda ordem. (BARBETTA, 1998; MONTGOMERY, 2001).

Estes dois modelos de regressão podem ser expressos da seguinte forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (\text{modelo de regressão linear múltipla}) \quad (\text{A.2})$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{modelo quadrático}) \quad (\text{A.3})$$

onde os parâmetros β_j , $j=0,1,\dots, k$, são chamados de coeficientes de regressão.

Com os dados resultantes do experimento, a identificação dos efeitos significativos pode ser realizada através de técnicas formais, como o teste t ou F da análise de variância, ou por métodos visuais. Para realizar os testes estatísticos da análise de variância, é necessário estimar a variância do erro. Ela pode ser estimada quando o experimento tem replicações, quando houver ensaios adicionados ao ponto central ou ainda agregando os efeitos de menor magnitude ao termo erro. (KNIESS, 2005). O gráfico normal de efeitos é também utilizado por muitos autores na avaliação dos efeitos mais significantes. Os efeitos não significativos tendem a ficar em torno de uma reta que passa pela origem, enquanto os significativos ficam nas extremidades e fora da linha reta. (BARBETTA, 1998; KNIESS, 2005).

A.1 Análise de Variância e Teste de Hipóteses

Muitas vezes, em estudos que envolvam diferentes tratamentos, tenham eles um único fator em vários níveis ou a combinação de vários fatores em diferentes níveis, deseje-se obter informações sobre a diferença entre os tratamentos e/ou a influência dos diferentes

fatores nas respostas obtidas. O uso de testes estatísticos é bastante empregado nesses casos, auxiliando nas tomadas de decisões em relação aos diferentes tratamentos ou fatores estudados.

Estes testes estatísticos usam informações de uma amostra aleatória proveniente de uma população de interesse. A afirmação sobre um determinado parâmetro é chamada hipótese. O teste de hipóteses consiste em um procedimento de tomada de decisão sobre a hipótese, aceitando-a ou rejeitando-a. Se a informação que obtivermos for consistente com a hipótese, conclui-se que a hipótese é verdadeira; caso contrário, conclui-se que a hipótese é falsa. A rejeição da hipótese nula sempre leva à aceitação da hipótese alternativa. (MONTGOMERY, 2001).

O procedimento de decisão pode conduzir a dois tipos de erro. O erro tipo I, cuja probabilidade de cometê-lo é chamada de nível de significância do teste (α), definido como a rejeição da hipótese nula H_0 quando, de fato, ela é verdadeira; e o erro tipo II, definido como a falha em rejeitar a hipótese nula, quando ela for falsa. A probabilidade do erro tipo II é denotada por β .

Testar a hipótese envolve considerar uma amostra aleatória, computar uma estatística de teste a partir de dados amostrais e, então, usá-la para tomar uma decisão a respeito da hipótese nula.

Suponha que se deseje comparar “a” tratamentos ou níveis diferentes de uma único fator. Os dados observados aparecem como na Tabela A.2.

Tabela A.2 – Dados de um experimentos com “a” tratamentos.

<i>Tratamento</i>	<i>Observações</i>				<i>Totais</i>	<i>Média</i>
1	y_{11}	y_{12}	·	y_{1n}	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	·	y_{2n}	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·
a	y_{a1}	y_{a2}	·	y_{an}	$y_{a.}$	$\bar{y}_{a.}$
					$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

O valor total das observações sujeitas ao i-ésimo tratamento é denotado por y_i . e \bar{y}_i representa a média das observações sujeitas ao i-ésimo tratamento; o total global de todas as observações é denotado por y_{tt} e a média global por \bar{y}_{tt} :

$$\begin{aligned}
 y_{i.} &= \sum_{j=1}^n y_{ij} & \bar{y}_{i.} &= \frac{y_{i.}}{n} & \text{para } j=1,2,\dots,n \\
 y_{..} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} & \bar{y}_{..} &= \frac{y_{..}}{N} & \text{para } i=1,2,\dots,a
 \end{aligned}
 \tag{A.4}$$

onde $i=1,2,\dots,a$ é o número de tratamentos; $j=1,2,\dots,n$ é o número de observações e $N=a.n$ é o número total de observações de todo o experimento.

A resposta para cada um dos a tratamentos é uma variável aleatória, descrita pelo modelo linear estatístico:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \tag{A.5}$$

onde μ é a média global de todos os tratamentos, τ_i é o efeito do i -ésimo tratamento e ε_{ij} é um componente de erro aleatório.

Pode-se escrever a Equação (A.5) como:

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} \tag{A.6}$$

onde $\mu_i = \mu + \tau_i$ é a média do i -ésimo tratamento. Assim, cada tratamento define uma população que tem média μ_i , consistindo na média global μ mais o efeito do τ_i , devido a um tratamento em particular.

Os efeitos dos tratamentos τ_i são geralmente definidos como desvios da média global μ , de modo que $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$. Estamos interessados em testar a igualdade das médias dos a tratamentos, ou seja, queremos verificar a hipótese

$$\begin{aligned}
 H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a & & \text{onde } k=1,2,\dots,n & \tag{A.7} \\
 H_1: \mu_i \neq \mu_k & \text{ para pelo menos um par } (i,k)
 \end{aligned}$$

o que equivale a dizer:

$$\begin{aligned}
 H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 & & \tag{A.8} \\
 H_1: \tau_i \neq 0 & \text{ para no mínimo um valor de } i
 \end{aligned}$$

Se a hipótese nula for verdadeira, cada observação consiste na média global μ mais um componente de erro aleatório ε_{ij} ; equivalente a dizer que todas as N observações

são tomadas de uma distribuição normal, com média m e variância σ^2 . Se a hipótese nula for verdadeira, a mudança nos níveis do fator não tem efeito na resposta média.

Para testar essas hipóteses, a melhor opção é a abordagem da análise de variância. O princípio básico desse método é dividir a variabilidade total nos dados da amostra em dois componentes. Assim, o teste de hipóteses é baseado na comparação de duas estimativas independentes da variância da população. Essa variabilidade total é expressa em termos da soma quadrática total, SQ_T : (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE,2004)

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2, \quad (\text{A.9})$$

que se for dividida por $N-1$ graus de liberdade, tem-se a variância da amostra dos y 's, que é uma medida padrão da variabilidade. Graus de liberdade é um conceito ligado ao número de dados independentes para o cálculo de um parâmetro.

A soma quadrática total pode ser dividida nos seguintes termos:

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n [(\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}) + (y_{ij} - \bar{y}_{i.})]^2 \quad (\text{A.10})$$

que após manipulações algébricas e mostrando que o termo do produto cruzado é zero, é dada por:

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (\text{A.11})$$

A Equação (A.11) mostra que a variabilidade total nos dados, medida pela soma quadrática total, pode ser dividida em uma soma quadrática das diferenças entre as médias dos tratamentos e a média global e em uma soma quadrática das diferenças das observações dentro de um tratamento em relação à média dos tratamentos. A diferença entre as médias observadas nos tratamentos e a média global medem as diferenças *entre* os tratamentos, enquanto as diferenças das observações dentro de um tratamento em relação a média dos tratamentos medem as diferenças *dentro* dos tratamentos. A diferença dentro dos tratamentos é devido somente a erros aleatórios. A Equação (A.11) pode ser então expressa por:

$$SQ_T = SQ_{Tratamentos} + SQ_E \quad (A.12)$$

em que $SQ_{Tratamentos}$ representa a soma quadrática dos tratamentos (entre os tratamentos) e SQ_E representa a soma quadrática do erro (dentro dos tratamentos). Os graus de liberdade dessas somas são, respectivamente, $a - 1$ e $N - a$.

Se a Equação (A.12) for dividida por graus de liberdade apropriados, fica-se com duas estimativas para a variância da amostra, σ^2 : uma baseada na variabilidade inerente *dentro* dos tratamentos e uma outra baseada na variabilidade *entre* os tratamentos. Se não houver diferença entre as médias dos tratamentos, essas estimativas serão iguais.

De modo a determinar as estimativas das variâncias de cada termo do segundo membro da Equação A.12 pode-se proceder conforme detalhamento a seguir.

Expressando a soma quadrática do erro sob outra forma, tem-se:

$$SQ_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^a \left[\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \right] \quad (A.13)$$

Dividindo-se o termo em colchetes da Equação (A.12) pelo número de graus de liberdade dentro dos a tratamentos ($n-1$), ter-se-á a variância das observações no i -ésimo tratamento, S_i^2 . A Equação (A.13) pode assim ser escrita:

$$\frac{SQ_E}{\sum_{i=1}^a (n-1)} = \frac{SQ_E}{(N-1)} = \sum_{i=1}^a \left[\frac{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{(n-1)} \right] = \sum_{i=1}^a S_i^2 \quad (A.14)$$

O termo à esquerda da Equação (A.14) corresponde à estimativa combinada da variância comum dentro de cada um dos a tratamentos, sendo chamado de média quadrática do erro, MQ_E . N é igual ao número total de observações, ou seja, $N=an$.

Similarmente, se não existir diferença entre os a médias dos tratamentos, a média quadrática dos tratamentos será dada dividindo-se a soma quadrática dos tratamentos pelo número de graus de liberdade dos tratamentos, de forma que:

$$MQ_{tratamentos} = \frac{SQ_{tratamentos}}{(a-1)} = \frac{n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2}{(a-1)} = n \left(\frac{\sigma^2}{n} \right) \quad (A.15)$$

onde (σ^2/n) a variância das médias dos tratamentos.

Segundo Montgomery (2001), os valores esperados das médias quadráticas dos tratamentos e do erro são dados por (para detalhes, ver MONTGOMERY, 2001):

$$E(MQ_{\text{Tratamentos}}) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a T_i^2}{a-1} \quad (\text{A.16})$$

$$E(MQ_E) = \sigma^2$$

Percebe-se que se não houver diferença nas médias dos tratamentos (o que implica em $\tau_i = 0$), $MQ_{\text{Tratamentos}} = \sigma^2$. Logo, pode-se detectar diferenças nas médias dos tratamentos se $MQ_{\text{Tratamentos}}$ e MQ_E forem comparados.

O teste de hipótese apresentado anteriormente utiliza a estatística F , dada por:

$$F_0 = \frac{SQ_{\text{tratamentos}}/(a-1)}{SQ_E/(N-a)}, \quad (\text{A.17})$$

com $a-1$ e $N-a$ como graus de liberdade do numerador e denominador, respectivamente.

A rejeição de H_0 implica que pelo menos uma das variáveis independentes contribui significativamente para o modelo. Assim, se a hipótese nula for verdadeira, as duas médias quadráticas estimam o mesmo valor para σ^2 . Mas se a hipótese nula for falsa, o numerador será maior do que o denominador. Logo, o teste rejeita a hipótese nula se F_0 exceder $F_{\alpha, a-1, N-a}$, ($F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$). $F_{\alpha, a-1, N-a}$ é a correspondente abscissa da distribuição F . (KNISS, 2005).

Em geral, nos planejamentos cujas a variável resposta de interesse observada é y , e é função de variáveis independentes (fatores) x_1, x_2, \dots, x_k , pode-se relacionar essa resposta aos níveis dos fatores que a afetam. Muitas vezes, no entanto, o pesquisador presume tal relação entre a resposta e os fatores que estão sendo estudados, tendo interesse em conferir tal hipótese. Através de um cuidadoso planejamento e de uma análise dos dados experimentais, pode-se modelar a resposta de interesse por uma função linear das variáveis independentes; isso é feito através de uma análise de regressão. Se a resposta for bem modelada por uma função linear das variáveis independentes, então a função de aproximação será o modelo de regressão linear múltipla. (BARBETTA, 1998; MONTGOMERY, 2001).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (\text{modelo de regressão linear múltipla})$$

Os parâmetros β_j , $j=0,1,\dots, k$, são chamados de coeficientes de regressão, estimados pelo método dos mínimos quadrados.

Nos problemas de regressão linear múltipla, é comum realizarem-se testes estatísticos sobre grupos de coeficientes ou sobre cada coeficiente individualmente, sendo úteis na investigação da efeito dos fatores na resposta desejada. Estes testes medem a adequação do modelo.

O teste para significância da regressão determina se existe relação linear entre a variável de resposta e o subconjunto de regressores x_1, x_2, \dots, x_k . A análise de variância pode ser usada para testar a significância da regressão; o procedimento divide a variabilidade total da variável de resposta nos componentes significantes: um que mede a variabilidade em y_i (valor observado), devido à linha de regressão e outro, mede a variabilidade residual deixada sem explicação pela linha de regressão. O teste mais geral sobre grupo de coeficientes nos problemas de regressão múltipla é o teste F, que verifica a significância do modelo como um todo. A hipótese nula testa que todos os coeficientes são nulos e, portanto, a sua rejeição é fundamental para que se continue trabalhando em termos da família de modelos estabelecida e dos fatores de entrada selecionados. A hipótese pode ser escrita como: (MONTGOMERY, 2001; BARBETTA, 1998)

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad (\text{A.18})$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ para pelo menos um } j$$

A rejeição de H_0 implica que pelo menos uma das variáveis independentes contribui significativamente para o modelo. A estatística desse teste é dada por:

$$F_0 = \frac{SQ_R / (p - 1)}{SQ_E / (n - p)}, \quad (\text{A.19})$$

onde: p = número de parâmetros do modelo;

n = número de observações;

$SQ_R = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2$, isto é, a soma dos quadrados devido ao modelo ou regressão;

$SQ_E = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$, isto é, a soma dos quadrados devido ao erro;

$\bar{y} = \sum_{i=1}^N y_i / n$, onde \bar{y} é a média das observações, \hat{y}_i é o valor predito para o modelo

e y_i é o valor observado.

Sob a hipótese nula, F_0 tem distribuição F com $(p-1)$ graus de liberdade no numerador e $(n-p)$ graus de liberdade no denominador. Logo, o teste rejeita a hipótese nula se F_0 exceder $F_{\alpha, p-1, n-p}$, ($F_0 > F_{\alpha, p-1, n-p}$). $F_{\alpha, p-1, n-p}$ é a correspondente abscissa da distribuição F (KNISS, 2005).

Além dos testes sobre o grupo de coeficientes como um todo, é interessante testar hipóteses para os coeficientes individuais do modelo de regressão. Tais testes são úteis na determinação do valor potencial de cada um dos regressores (variáveis independentes) no modelo de regressão. O teste mais geral sobre coeficientes individuais nos problemas de regressão múltipla é o teste T, da análise da variância. A hipótese nula testa que um determinado coeficiente individual de regressão, β_j , é nulo e, portanto, a sua rejeição implica que a variável independente, x_j , contribui significativamente para o modelo, não podendo ser retirado do modelo. A hipótese pode ser escrita como: (MONTGOMERY, 2001; BARBETTA, 1998)

$$\begin{aligned} H_0: \beta_j &= 0 \\ H_1: \beta_j &\neq 0, j = 0, 1, \dots, k \end{aligned} \tag{A.20}$$

A estatística desse teste é dada por:

$$T_0 = \frac{\hat{\beta}_j}{SE_{\text{coeficiente}}}, \tag{A.21}$$

onde: $\hat{\beta}_j$ = estimador do mínimo quadrado de β_j ;

$SE_{\text{coeficiente}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{n^{2k-2}}}$ é o erro padrão estimado para cada coeficiente.

$\hat{\sigma}^2 = \frac{SQ_E}{(n-p)}$ (média quadrática do erro) é o estimador da variância dos coeficientes

de regressão.

Assim, para testar a hipótese nula, o valor da estatística de teste t_0 deve ser calculado e H_0 é rejeitada se:

$$|t_0| > t_{\alpha/2, n-p}, \tag{A.22}$$

onde $t_{\alpha/2, n-p}$ é a correspondente abscissa da distribuição t de Student com $(n-p)$ graus de liberdade.

A determinação do parâmetro que quantifica a confiabilidade dos resultados experimentais ou significância estatística pode ser representada pelo teste p (denominação inglesa p-level). Especificamente, o p-level representa a probabilidade do erro envolvido na aceitação dos resultados observados como válidos. Por exemplo, um valor de p de 0,05 (isto é, 1/20) indica que existe uma probabilidade de 5% de que a relação entre as variáveis encontradas seja uma mera coincidência. Em muitas áreas de pesquisa, o p-level de 0,05 é usualmente considerado como o nível de erro limite para aceitação. (KNISS, 2005).

O valor de p é determinado mediante aplicações de uma técnica estatística apropriada a necessidade do desenvolvimento. Os ensaios que são realizados com replicações e baseiam-se na média entre as replicações dos próprios ensaios devem ter seus resultados tratados através da técnica de análise de variância (ANOVA), onde as médias são submetidas a testes estatísticos para determinação de diferenças significativas. A análise de variância utiliza relações que envolvem as dispersões de resultados entre as replicações dentro dos ensaios e entre todos os ensaios que, mediante os graus de liberdade entre e dentro dos ensaios, fornecem o nível de significância através do cálculo do teste F.

Alternativamente, utiliza-se o valor da estatística p no teste de hipóteses. O teste p resume o que os dados informam sobre a credibilidade da hipótese nula: H_0 é rejeitada se p (credibilidade de H_0) é menor que o nível de significância especificado no teste. (MONTGOMERY, 2001).

Dado o ajuste de um modelo, é comum avaliar a sua capacidade preditiva. Em geral, isso é feito pelo coeficiente de determinação R^2 , que fornece a proporção da variabilidade da resposta que pode ser explicada pelos fatores incluídos no modelo, admitindo correta a sua forma. (BARBETTA, 1998). Esse coeficiente pode ser definido da seguinte maneira:

$$R^2 = \frac{SQ_R}{SQ_T} \quad (A.23)$$

Considerando que o valor de R^2 sempre aumenta quando um regressor, estatisticamente significativo ou não, é adicionado ao modelo de regressão, é conveniente usar um R^2_{ajustado} definido como: (MONTGOMERY, 2001)

$$R^2_{\text{ajustado}} = 1 - \frac{SQ_E/(n-p)}{SQ_T/(n-1)} \quad (A.24)$$

A estatística R^2_{ajustado} aumentará somente se a adição de um regressor produzir uma redução na soma quadrática residual, que seja grande o suficiente para compensar a perda de um grau de liberdade, ou seja, se ela for estatisticamente significativa para o modelo. (MONTGOMERY, 2001).

A.2 Teste de Tukey

Quando é feita a análise de variância, o teste F mostra apenas se existe diferença significativa entre as médias dos tratamentos, não podendo indicar entre quais tratamentos há diferença e, conseqüentemente, indicar o melhor tratamento. Neste caso, é necessário aplicar um teste de comparação de médias dos tratamentos. Estes testes servem como um complemento para o estudo da análise de variância. Há vários testes de comparação de médias, entre os quais podemos citar: teste de Tukey, teste de Duncan, teste de Dunnet etc. Dentre estes, o teste de Tukey é o mais utilizado por ser bastante rigoroso e de fácil aplicação. É utilizado para testar toda e qualquer diferença entre duas médias de tratamento e é aplicado quando o teste F da análise de variância é significativo.

O teste de Tukey tem como base a DMS (diferença mínima significativa), representada no geral por Δ_α e calculada da seguinte forma:

$$\Delta_\alpha = q_\alpha(a, g|_E) \sqrt{\frac{\text{MSE}}{n}} \quad (\text{A.25})$$

onde $q_\alpha(a, g|_E)$ é o valor da amplitude estudentizada, cujo o valor é encontrado em tabelas (Anexo A), em função do número de tratamentos (a) e do número de grau de liberdade do resíduo ($g|_E$), ao nível α de probabilidade; MSE é a média quadrática do erro e n é o número de observações de cada tratamento.

Dois pares de médias, y_i e y_j , serão considerados estatisticamente diferentes se a diferença absoluta entre seus valores ultrapassar o valor de Δ_α , ou seja: (MONTGOMERY, 2001):

$$|y_i - y_j| > \Delta_\alpha \quad (\text{A.26})$$

APÊNDICE – B

DISPOSIÇÃO DOS TERMOPARES NO INTERIOR DO FORNO

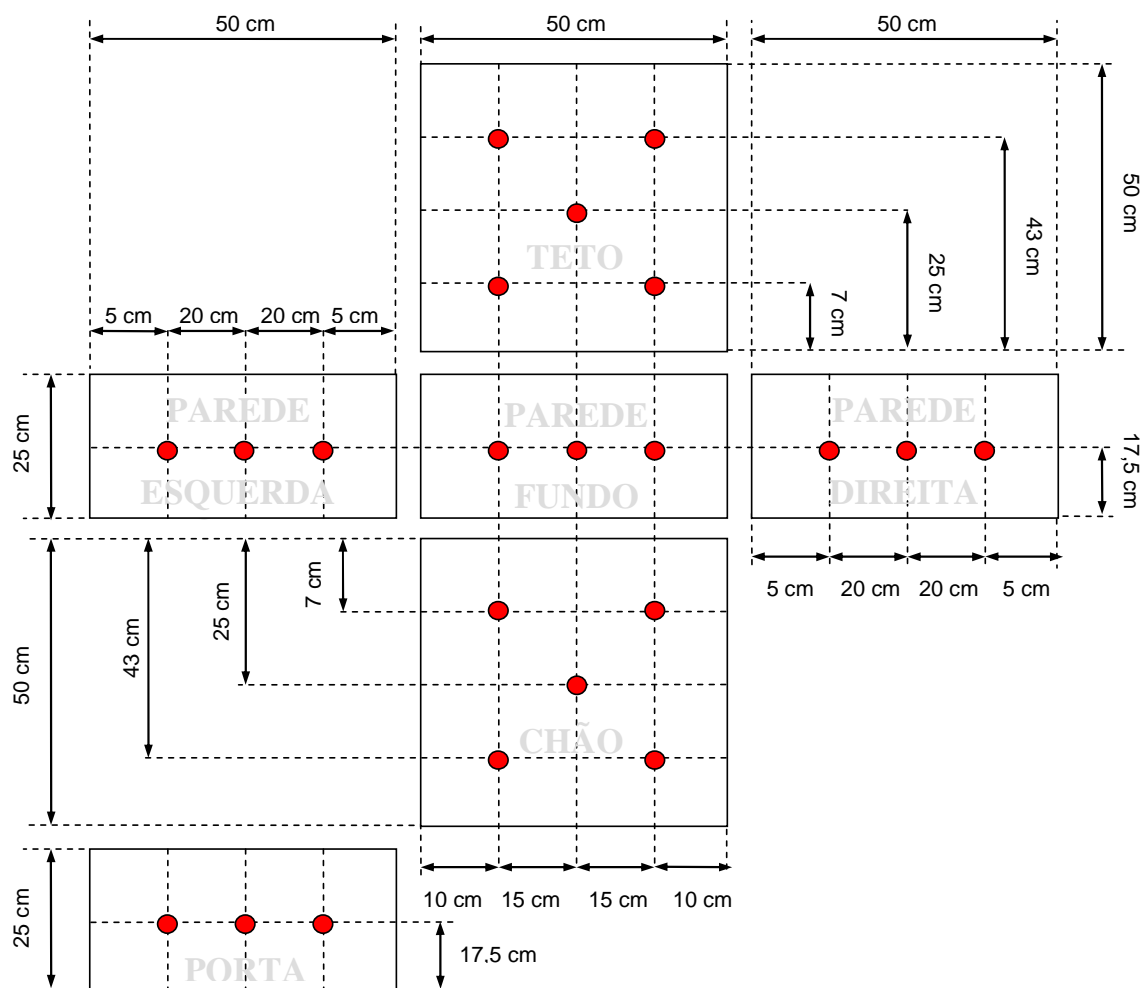


Figura B.1– Esquema da disposição dos termopares no interior do forno.

A temperatura de cada uma das paredes esquerda, fundo, direita e da porta foi monitorada por 3 sensores de temperaturas fixados ao longo do comprimento da parede e é expressa por uma equação do segundo grau da seguinte forma:

$$T(x) = ax^2 + bx + c \quad (\text{B.1})$$

onde x é a posição do sensor ao longo do comprimento da porta e a , b e c são os coeficientes da equação.

Como a cada intervalo de tempo eram medidas as temperaturas em três pontos da superfície, os coeficientes da equação puderam ser calculados pelas equações abaixo:

$$a = \frac{1}{(x_3 - x_1)} \left[\frac{(T_3 - T_2)}{(x_3 - x_2)} - \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)} \right] \quad (\text{B.1})$$

$$b = \frac{(T_3 - T_1)}{(x_3 - x_2)} - a(x_2 + x_3) \quad (\text{B.2})$$

$$c = T_1 - ax_1^2 - bx_1 \quad (\text{B.3})$$

onde os subscritos 1,2 e 3 referem-se aos termopares nas posições x_1 , x_2 e x_3 . A temperatura média da parede em cada instante foi calculada por:

$$T_{\text{média}} = \frac{1}{L_s} \int_0^{L_s} T(x) dx = a \frac{x^3}{3} + b \frac{x^2}{2} + cx \quad (\text{B.4})$$

As temperaturas das superfícies superior e inferior são monitoradas por cinco termopares, conforme ilustra a Figura A.1. Notou-se que a temperatura do termopar central apontava valores mais elevados que aqueles localizados ao seu redor. Dessa forma, a temperatura média em cada instante foi calculada através da média aritmética ponderada em relação à área, sendo a área relativa ao termopar central menor que as relativas aos demais termopares. A área total de cada superfície foi imaginariamente dividida em 16 quadrados idênticos. A área correspondente a cada termopar foi calculada conforme a divisão apresentada na Figura A.2. Dessa forma tem-se que a área correspondente ao termopar central é $312,5 \text{ cm}^2$ ($L_s^2/16$), enquanto as correspondentes aos demais termopares são $546,875 \text{ cm}^2$ ($7L_s^2/32$).

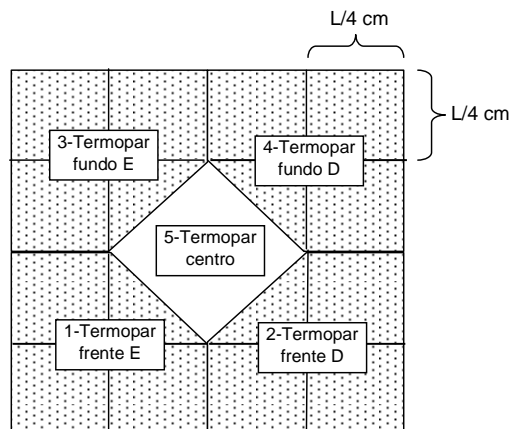


Figura B.2– Esquema da divisão das áreas para cálculo da temperatura média.

A temperatura média da superfície a cada instante é então calculada pela seguinte

equação:
$$T_{\text{média}} = \sum_{A=1}^5 \frac{A_i T_i}{A_{\text{total}}}$$

APÊNDICE – C

DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE FORMA ENTRE AS SUPERFÍCIES INTERNAS DO FORNO E A PIZZA

Nesta seção será apresentada a metodologia utilizada para a determinação dos fatores de forma entre as superfícies do forno e o bloco. Os fatores de forma foram obtidos de correlações tridimensionais presentes na literatura, Incropera e Dewitt (1998) e Siegel e Howel (1992). Uma figura esquemática das dimensões do forno e da pizza, utilizadas para os cálculos, é apresentada na Figura B.1. Os cálculos foram feitos com auxílio do software *Engineering Equation Solver* (EES).

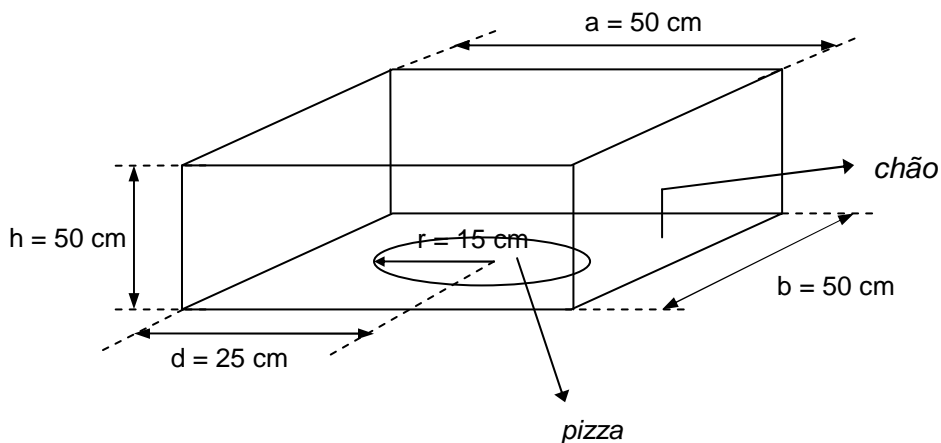


Figura C.1 – Esquema das dimensões do forno e da pizza

Parâmetros utilizados para os cálculos:

$$A_{\text{teto}} = a \cdot b \quad (\text{C.1})$$

$$A_{\text{parede}} = h \cdot b \quad (\text{C.2})$$

$$A_{\text{pizza}} = \pi r^2 \quad (\text{C.3})$$

$$A_{\text{base}} = A_{\text{chão}} + A_{\text{pizza}} = a \cdot b \quad (\text{C.4})$$

O fator de forma entre o teto do forno e a pizza é obtido através da seguinte equação: (ABISTEK et. al, citado por SIEGEL, HOWELL, 2001)

$$F_{\text{teto-pizza}} = \frac{3,2718(1+C^{1,6491})^{0,2834}}{[C^{1,5138}(AB)^{0,495}]^{2,0417}} \quad (\text{C.5})$$

onde: $A = a/r$; $B = b/r$; $C = h/r$

O fator de forma entre a parede do forno e a pizza é obtido utilizando-se as seguintes relações:

$$F_{\text{parede-base}} = F_{\text{parede-pizza}} + F_{\text{parede-chão}} \quad (\text{C.6})$$

$$F_{\text{parede-base}} A_{\text{parede}} = F_{\text{base-parede}} A_{\text{base}} \quad (\text{C.7})$$

Fator de forma entre superfície inferior (base) e superfície lateral (parede) do forno: (SIEGEL, HOWELL, 2001)

$$F_{\text{base-parede}} = \frac{1}{\pi W} \left(W \arctan \frac{1}{W} + H \arctan \frac{1}{H} - \sqrt{H^2 + W^2} \arctan \frac{1}{\sqrt{H^2 + W^2}} \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \ln \left\{ \frac{(1+W^2)(1+H^2)}{1+W^2+H^2} \left[\frac{W^2(1+W^2+H^2)}{(1+W^2)(W^2+H^2)} \right]^{W^2} \left[\frac{H^2(1+H^2+W^2)}{(1+H^2)(H^2+W^2)} \right]^{H^2} \right\} \right) \quad (\text{C.8})$$

onde: $H = \frac{h}{b}$; $W = \frac{a}{b}$

O fator de forma entre a parede e o chão é dado pelas seguintes relações:

$$F_{\text{parede-chão}} A_{\text{parede}} = F_{\text{chão-parede}} A_{\text{chão}} \quad (\text{C.9})$$

$$4F_{\text{chão-parede}} + F_{\text{chão-teto}} = 1 \quad (\text{C.10})$$

$$F_{\text{chão-teto}} A_{\text{chão}} = F_{\text{teto-chão}} A_{\text{teto}} \quad (\text{C.11})$$

$$F_{\text{teto-base}} = F_{\text{teto-pizza}} + F_{\text{teto-chão}} \quad (\text{C.12})$$

$$F_{\text{teto-base}} A_{\text{teto}} = F_{\text{base-teto}} A_{\text{base}} \quad (\text{C.13})$$

Onde o fator de forma entre superfície inferior (base) e superfície superior (teto) do forno: (SIEGEL, HOWELL, 2001)

$$F_{\text{base-teto}} = \frac{2}{\pi XY} \left[\ln \left(\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2} \right)^{1/2} + X\sqrt{1+Y^2} \arctan \left(\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right. \\ \left. + Y\sqrt{1+X^2} \arctan \left(\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) - X \arctan(X) - Y \arctan(Y) \right] \quad (\text{C.14})$$

onde: $X = \frac{a}{h}$; $Y = \frac{b}{h}$

O software programado com as equações acima forneceu os seguintes valores para os fatores de forma:

$$F_{\text{teto-pizza}} = 0,1437$$

$$F_{\text{parede-pizza}} = 0,06954$$

$$F_{\text{parede-base}} = 0,2924$$

$$F_{\text{base-parede}} = 0,1462$$

$$F_{\text{base-teto}} = F_{\text{teto-base}} = 0,4153$$

$$F_{\text{parede-chão}} = 0,2228$$

$$F_{\text{chão-parede}} = 0,1553$$

$$F_{\text{teto-chão}} = 0,2716$$

APÊNDICE – D

DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE COCÇÃO DA PIZZA

Apêndice D1 – Definição dos atributos de qualidade sensorial estudados e construção da escala padrão de cor

Apêndice D2 – Temperatura do forno e massa da pizza sob as diferentes configurações do forno testadas.

Apêndice D3 – Estudo sobre a influência da configuração do forno na qualidade da pizza: qualidade sensorial e requisitos de segurança.

Apêndice D4 – Determinação das melhores condições de operação do forno para a cocção da pizza.

APÊNDICE D1 – DEFINIÇÃO DOS ATRIBUTOS DE QUALIDADE SENSORIAL ESTUDADOS E CONSTRUÇÃO DA ESCALA PADRÃO DE COR

D1.1 DEFINIÇÃO DOS ATRIBUTOS DE QUALIDADE SENSORIAL ESTUDADOS

A Tabela D1.1 refere-se aos dados obtidos em pesquisa sobre o grau de importância dos atributos cor (C), textura da crosta (TC) e elasticidade da massa (EM), no julgamento da qualidade de pizzas.

Tabela D1.1 – Dados referentes à definição dos atributos sensoriais, relacionados à qualidade da pizza, a serem estudados.

<i>Julgador</i>	<i>Ordem de importância</i>					<i>Julgador</i>	<i>Ordem de importância</i>				
	C	TC	EM	Sexo	Idade		C	TC	EM	Sexo	Idade
1	1	3	2	m	27	51	1	3	2	m	35
2	1	3	2	f	57	52	1	3	2	f	31
3	1	2	3	m	28	53	1	2	3	f	20
4	1	2	3	f	20	54	1	2	3	m	20
5	1	2	3	m	18	55	1	3	2	m	21
6	1	3	2	f	21	56	1	3	2	m	19
7	1	2	3	f	22	57	2	1	3	m	22
8	1	2	3	m	20	58	1	3	2	f	24
9	2	1	3	m	29	59	1	3	2	f	51
10	1	2	3	m	49	60	2	1	3	m	38
11	1	2	3	f	19	61	1	2	3	f	41
12	1	3	2	f	20	62	1	2	3	m	37
13	1	2	3	m	18	63	2	3	1	f	40
14	1	2	3	f	49	64	2	3	1	m	25
15	1	3	2	m	48	65	1	2	3	m	26
16	2	1	3	f	26	66	1	3	2	m	33
17	1	2	3	m	25	67	1	3	2	f	19
18	1	3	2	m	32	68	1	3	2	m	24
19	1	3	2	m	43	69	2	3	1	f	42
20	1	3	2	f	19	70	1	3	2	f	47
21	1	2	3	m	30	71	1	2	3	m	50
22	1	3	2	f	21	72	1	2	3	f	61
23	1	2	3	f	21	73	2	1	3	f	20
24	1	2	3	m	23	74	1	3	2	m	19
25	1	2	3	f	22	75	1	3	2	f	21
26	3	1	2	m	52	76	2	3	1	m	18
27	2	3	1	f	45	77	2	3	1	f	20
28	1	3	2	f	36	78	2	3	1	m	20
29	1	3	2	m	42	79	1	2	3	m	20
30	1	2	3	f	26	80	1	2	3	m	21

Tabela D1.1 (continuação) – Dados referentes à definição dos atributos sensoriais, relacionados à qualidade da pizza, a serem estudados.

Julgador	Ordem de importância					Julgador	Ordem de importância				
	C	TC	EM	Sexo	Idade		C	TC	EM	Sexo	Idade
31	1	2	3	m	29	81	1	2	3	f	23
32	1	2	3	f	34	82	1	2	3	m	22
33	2	1	3	m	30	83	2	1	3	f	41
34	1	2	3	f	27	84	2	1	3	f	28
35	1	2	3	m	42	85	1	2	3	f	30
36	1	2	3	f	49	86	1	3	2	m	35
37	1	3	2	f	52	87	2	1	3	f	28
38	1	3	2	m	63	88	2	1	3	m	27
39	2	3	1	f	21	89	1	3	2	f	26
40	1	2	3	m	22	90	1	2	3	f	29
41	2	1	3	f	22	91	1	2	3	m	19
42	1	3	2	m	19	92	1	3	2	f	21
43	1	3	2	f	18	93	2	1	3	m	20
44	2	1	3	f	20	94	1	2	3	f	33
45	2	3	1	m	23	95	2	3	1	m	24
46	1	2	3	f	25	96	2	1	3	f	23
47	1	2	3	m	24	97	1	2	3	f	46
48	1	3	2	f	23	98	1	3	2	m	44
49	1	3	2	m	21	99	1	3	2	f	54
50	2	3	1	f	32	100	2	1	3	f	47

Tabela D1.2 – Análise de variância para os dados da Tabela D1.1.

<i>Análise de variância</i>						
Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	F	F _{crit}	Valor-p
Atributos	2	78,70	39,370	96,4	3,03	0,000
Erro	297	121,260	0,408			
Total	299	200				

D1.2 CONSTRUÇÃO DA ESCALA PADRÃO DE COR

As imagens apresentadas na Figura D1.1 referem-se à construção da escala padrão de cor e foram obtidas e devidamente codificadas, conforme descrito no Capítulo III.

A Tabela D1.3 apresenta os dados obtidos pelo Teste de Aceitação, utilizado na construção da escala padrão de cor. A Tabela D1.4 traz a o cálculo das médias, análise de variância e teste de Tukey para esses dados.



Código 453



Código 278



Código 961



Código 724



Código 372



Código 196



Código 537



Código 849



Código 607



Código 110

Figura D1.1 – Pizzas fotografadas e devidamente codificadas para a construção da escala padrão de cor.

Tabela D1.3 – Dados obtidos pelo Teste de Aceitação, escala hedônica de 5 pontos: (1) Desgostei muito, (2) Desgostei, (3) Indiferente, (4) Gostei, (5) Gostei muito, para a construção da escala padrão de cor.

<i>Julgador</i>	<i>Pizza (Código)</i>									
	P278	P372	P961	P607	P196	P453	P724	P537	P849	P110
1	4	5	4	1	5	1	4	3	2	1
2	3	4	5	1	4	2	3	2	1	1
3	2	3	5	1	2	2	5	2	1	1
4	3	5	4	1	4	4	3	3	4	1
5	5	2	3	1	2	4	4	2	1	1
6	1	5	2	3	1	4	1	2	1	1
7	3	5	5	1	3	2	4	3	1	1
8	2	4	2	1	5	2	3	1	1	1
9	2	5	4	1	5	1	4	2	1	1
10	2	3	4	1	2	1	4	1	1	1
11	3	5	4	2	4	2	3	3	2	1
12	3	4	4	1	5	2	4	3	1	1
13	2	4	5	1	4	1	4	2	2	1
14	2	2	4	1	2	2	4	2	1	1
15	2	5	4	1	2	1	4	2	1	1
16	3	4	3	1	2	1	3	1	1	1
17	3	5	4	1	5	2	4	3	2	1
18	2	4	4	1	4	1	3	2	1	1
19	2	5	4	1	3	1	4	3	1	1
20	2	5	3	1	4	2	3	2	2	1
21	2	3	5	1	4	1	5	2	1	1
22	2	5	3	1	4	1	3	4	1	1
23	2	5	2	1	5	1	3	4	2	1
24	3	4	2	1	4	3	3	3	2	1
25	2	5	3	1	4	2	3	3	2	1
26	2	4	4	2	4	1	4	2	1	1
27	1	4	2	1	4	1	2	4	2	1
28	2	4	5	1	2	2	5	2	2	1
29	2	4	5	1	2	2	5	2	2	1
30	3	4	5	1	4	2	4	2	2	1
31	2	5	3	1	4	1	3	3	2	1
32	1	4	3	2	5	1	4	5	2	1
33	1	3	4	1	2	1	4	1	1	1
34	2	5	3	1	4	1	3	3	2	1
35	2	4	5	1	4	1	4	2	2	1
36	2	2	4	1	2	2	4	2	1	1
37	2	5	4	1	2	1	4	2	1	1
38	3	4	3	1	2	1	3	1	1	1
39	3	5	4	1	5	2	4	3	2	1

Tabela D1.3 (continuação) – Dados obtidos pelo Teste de Aceitação, escala hedônica de 5 pontos: (1) Desgostei muito, (2) Desgostei, (3) Indiferente, (4) Gostei, (5) Gostei muito, para a construção da escala padrão de cor.

<i>Julgador</i>	<i>Pizza (Código)</i>									
	P278	P372	P961	P607	P196	P453	P724	P537	P849	P110
40	2	4	4	1	4	1	3	2	1	1
41	2	5	4	1	3	1	4	3	1	1
42	2	4	4	2	4	1	4	2	1	1
43	1	4	2	1	4	1	2	4	2	1
44	2	4	5	1	2	2	5	2	2	1
45	2	4	5	1	2	2	5	2	2	1
46	3	4	5	1	4	2	4	2	2	1
47	2	5	3	1	4	1	3	3	2	1
48	1	4	3	2	5	1	4	5	2	1
49	1	3	4	1	2	1	4	1	1	1
50	2	5	3	1	4	1	3	3	2	1
51	3	5	5	1	3	2	4	3	1	1
52	2	4	2	1	5	2	3	1	1	1
53	2	5	4	1	5	1	4	2	1	1
54	2	3	4	1	2	1	4	1	1	1
55	3	5	4	2	4	2	3	3	2	1
56	3	4	4	1	5	2	4	3	1	1
57	4	5	4	1	5	1	4	3	2	1
58	3	4	5	1	4	2	3	2	1	1
59	2	3	5	1	2	2	5	2	1	1
60	3	5	4	1	4	4	3	3	4	1
61	5	2	3	1	2	4	4	2	1	1
62	1	5	2	3	1	4	1	2	1	1
63	2	5	3	1	4	2	3	2	2	1
64	2	3	5	1	4	1	5	2	1	1
65	2	5	3	1	4	1	3	4	1	1
66	2	5	2	1	5	1	3	4	2	1
67	3	4	2	1	4	3	3	3	2	1
68	2	5	3	1	4	2	3	3	2	1

Tabela D1.4 – Análise de variância para os dados da Tabela D1.3.

<i>Análise de variância</i>						
Fonte	Graus de Liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	F	F _{crit}	Valor-p
Pizzas	9	836,494	92,944	136,18	1,9	0,000
Erro	670	457,294	0,683			
Total	679	1293,788				

APÊNDICE D2 – TEMPERATURA DO FORNO E DA MASSA DA PIZZA SOB AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DO FORNO TESTADAS

As figuras a seguir referem-se aos gráficos de temperatura do forno e da temperatura no interior da massa de pizza, juntamente com um resumo da configuração do forno de cada teste e da imagens das pizzas obtidas sob tais configurações.

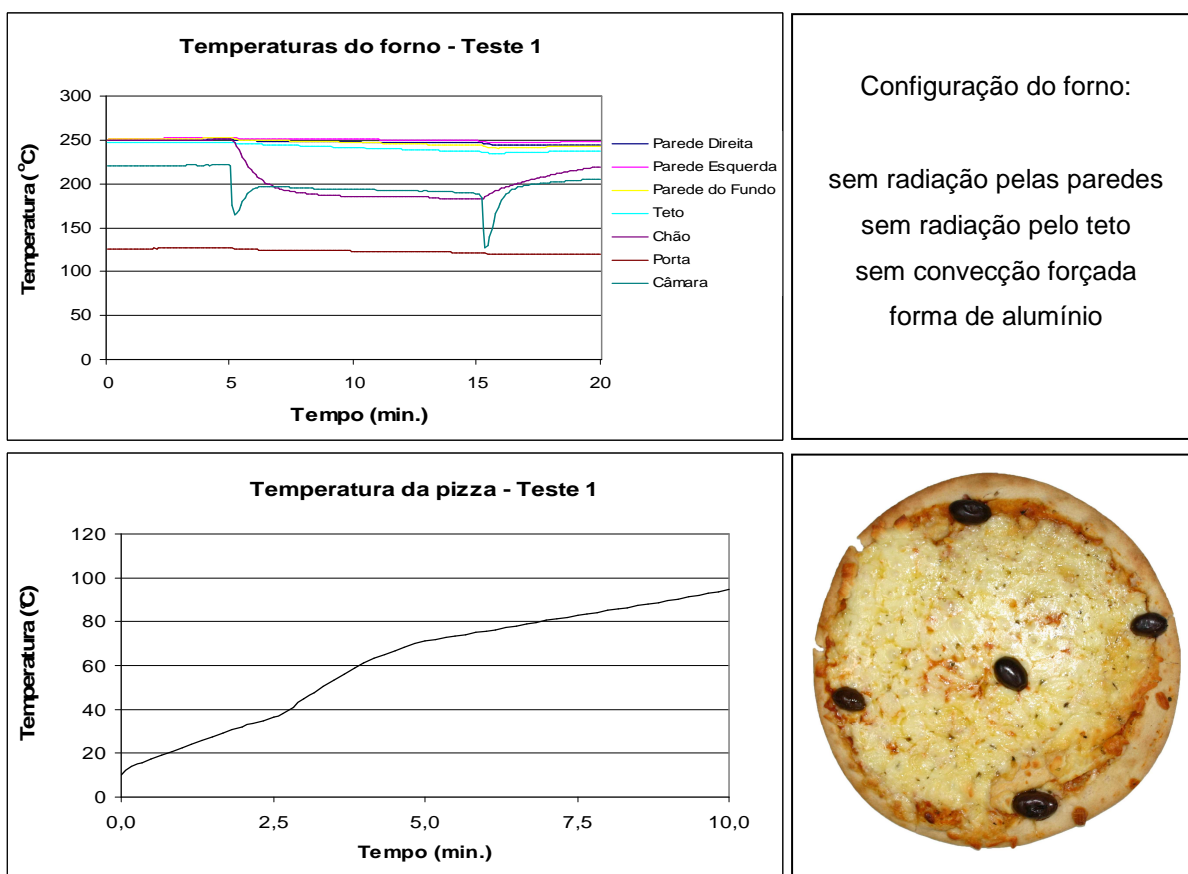
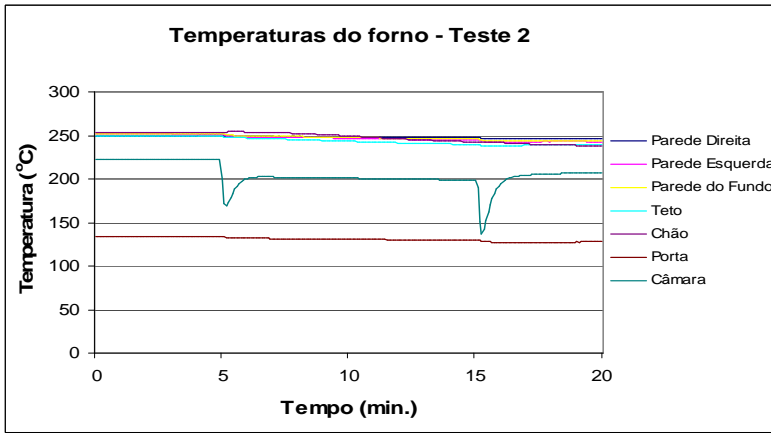


Figura D2.1 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 1 e pizza obtida sob esta condição



Configuração do forno:
 sem radiação pelas paredes
 sem radiação pelo teto
 sem convecção forçada
 forma de pedra

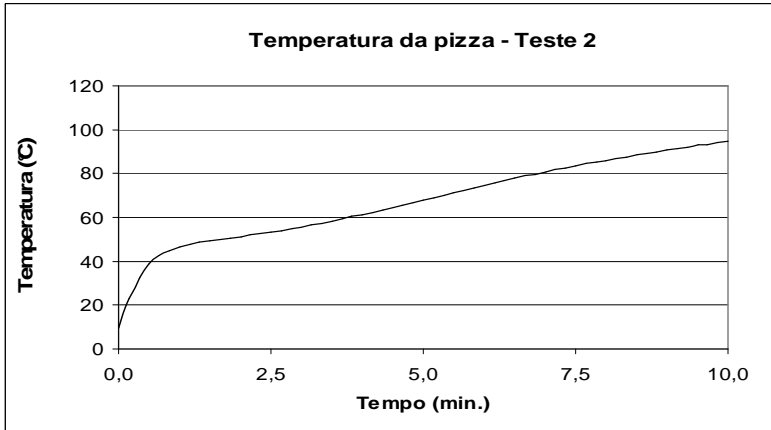
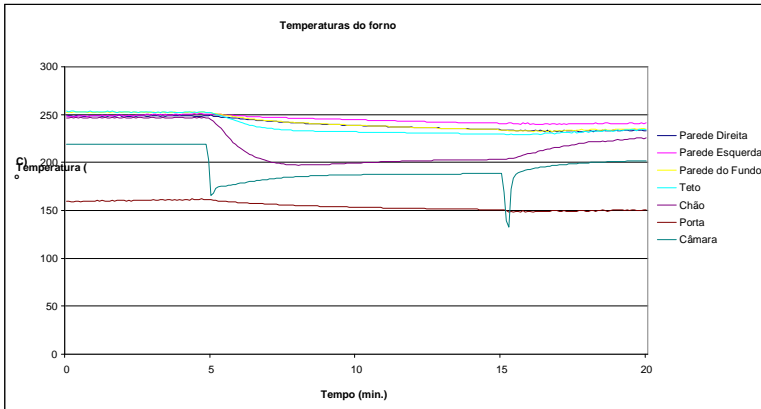


Figura D2.2 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 2 e pizza obtida sob esta condição



Configuração do forno:
 sem radiação pelas paredes
 sem radiação pelo teto
 com convecção forçada
 forma de alumínio

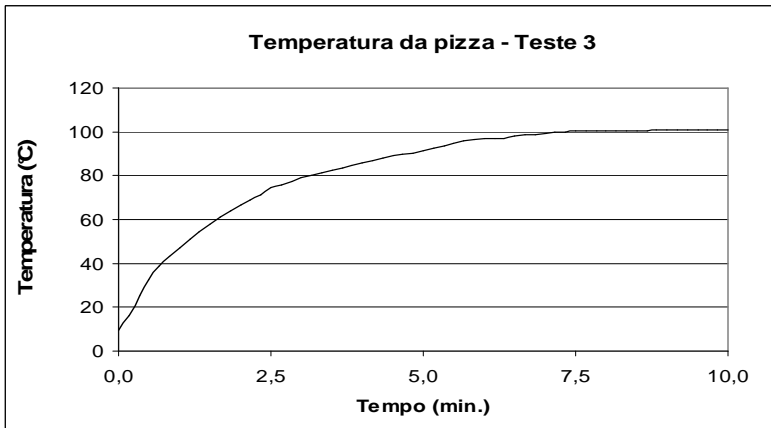
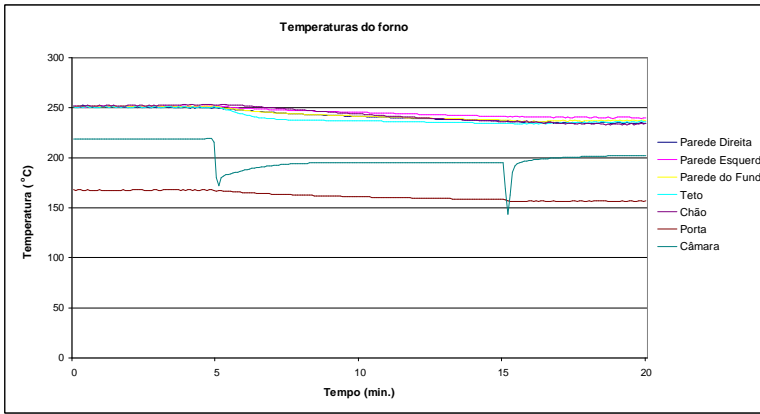


Figura D2.3 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 3 e pizza obtida sob esta condição.



Configuração do forno:
 sem radiação pelas paredes
 sem radiação pelo teto
 com convecção forçada
 forma de pedra

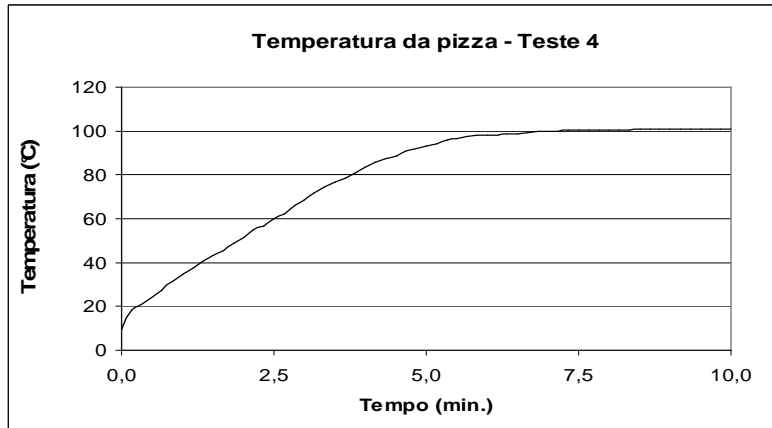
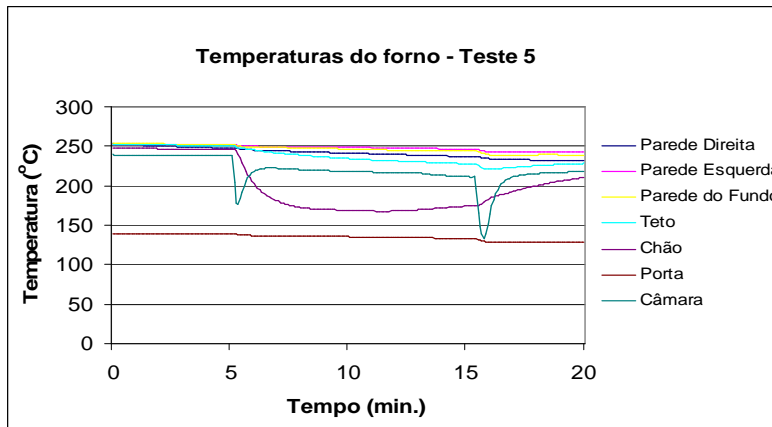


Figura D2.4 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 4 e pizza obtida sob esta condição.



Configuração do forno:
 sem radiação pelas paredes
 com radiação pelo teto
 sem convecção forçada
 forma de alumínio

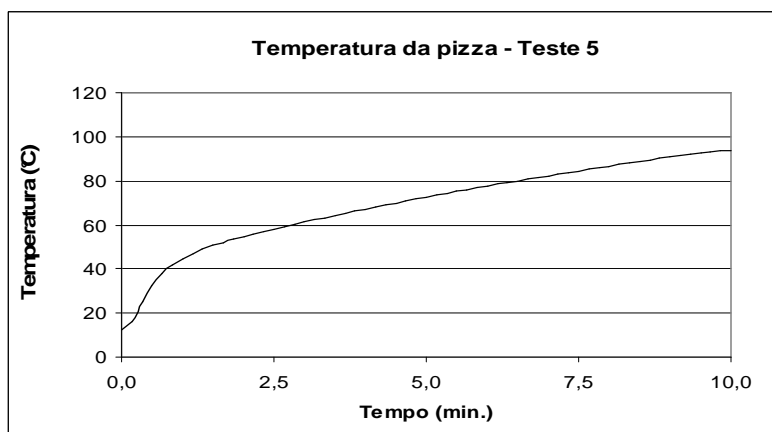
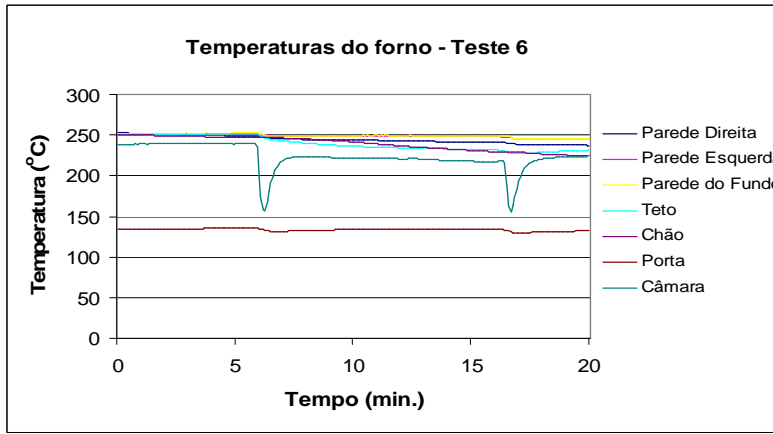


Figura D2.5 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 5 e pizza obtida sob esta condição.



Configuração do forno:
 sem radiação pelas paredes
 com radiação pelo teto
 sem convecção forçada
 forma de pedra

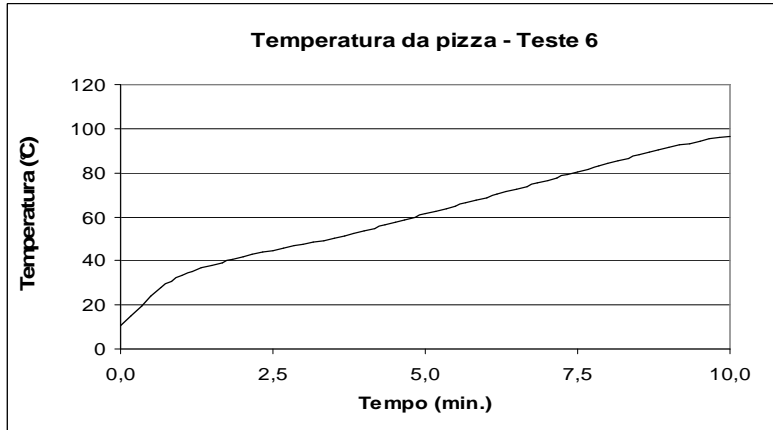
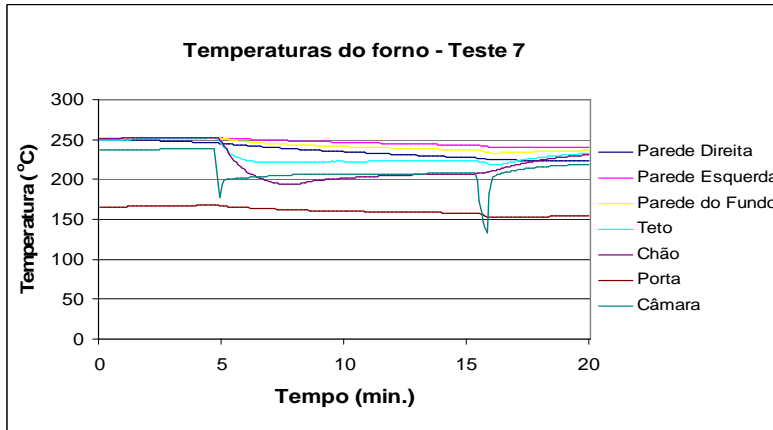


Figura D2.6 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 6 e pizza obtida sob esta condição.



Configuração do forno:
 sem radiação pelas paredes
 com radiação pelo teto
 com convecção forçada
 forma de alumínio

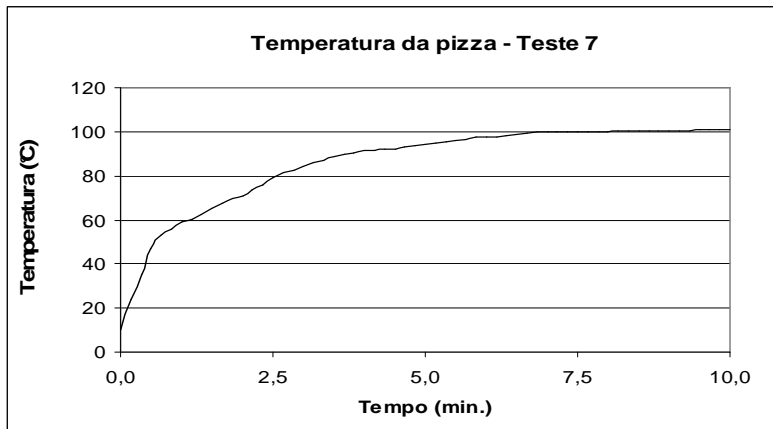


Figura D2.7 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 7 e pizza obtida sob esta condição.

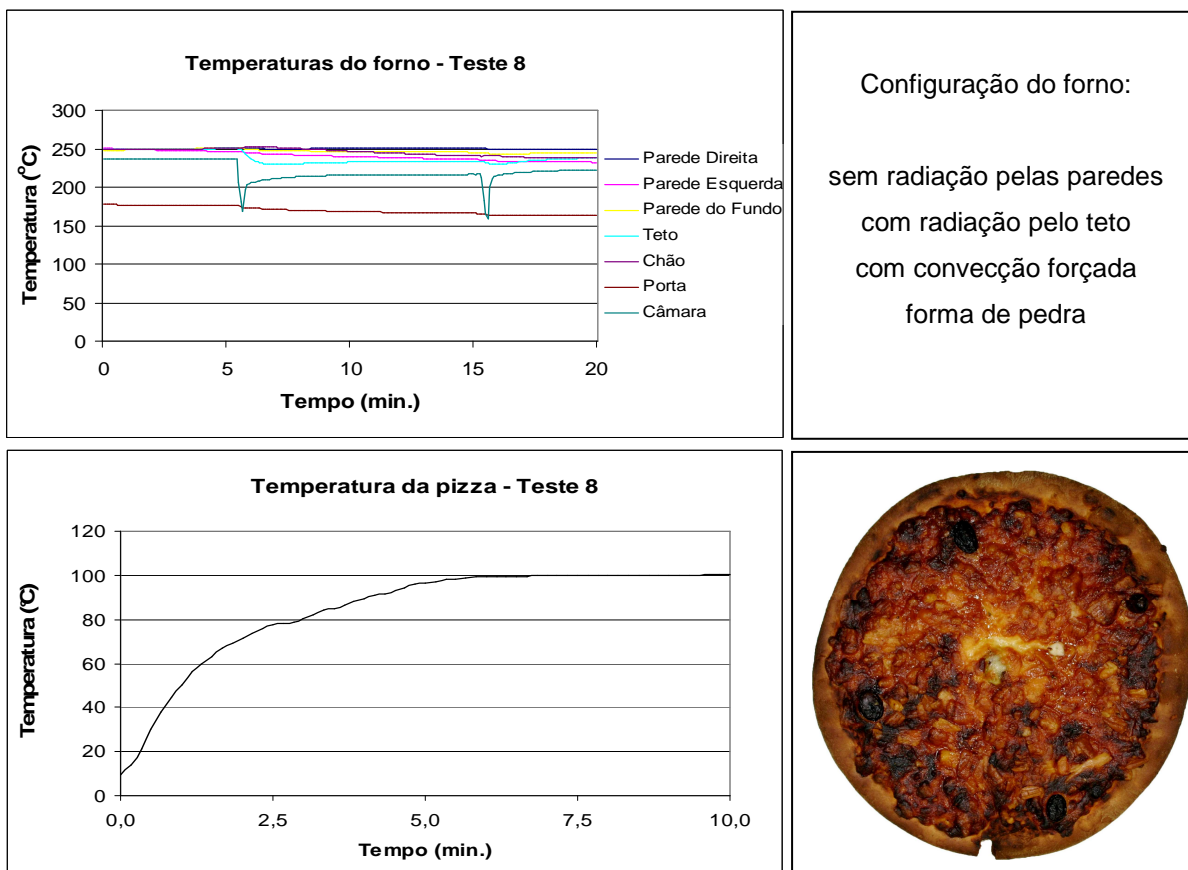


Figura D2.8 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 8 e pizza obtida sob esta condição.

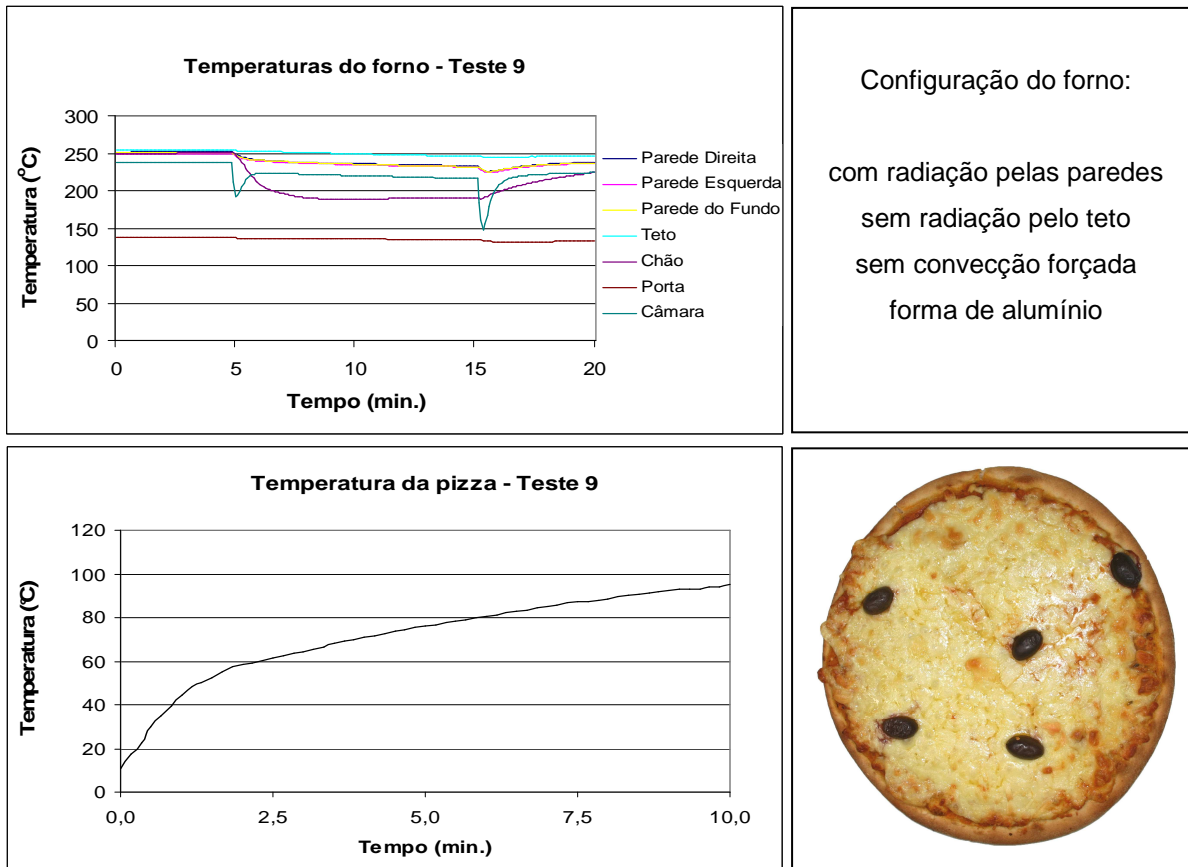


Figura D2.9 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 9 e pizza obtida sob esta condição.

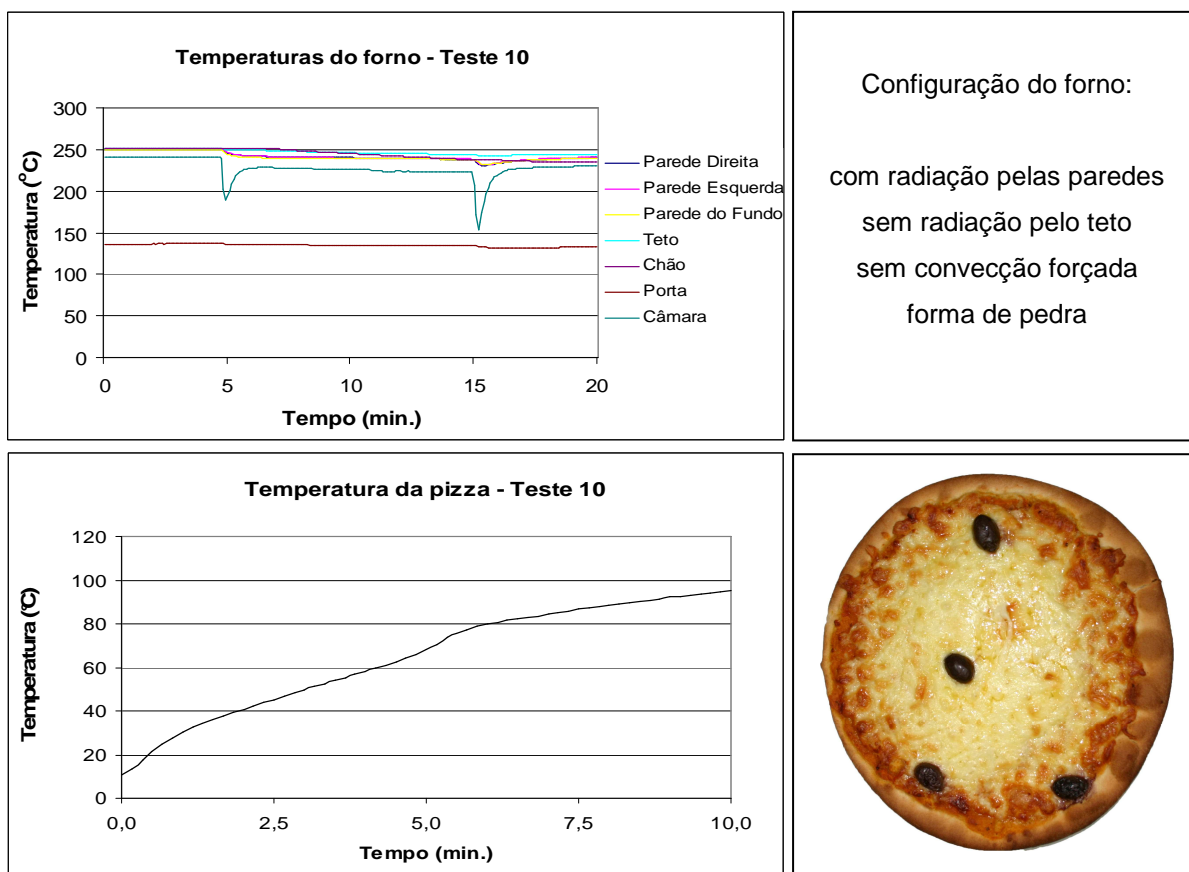


Figura D2.10 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 10 e pizza obtida sob esta condição.

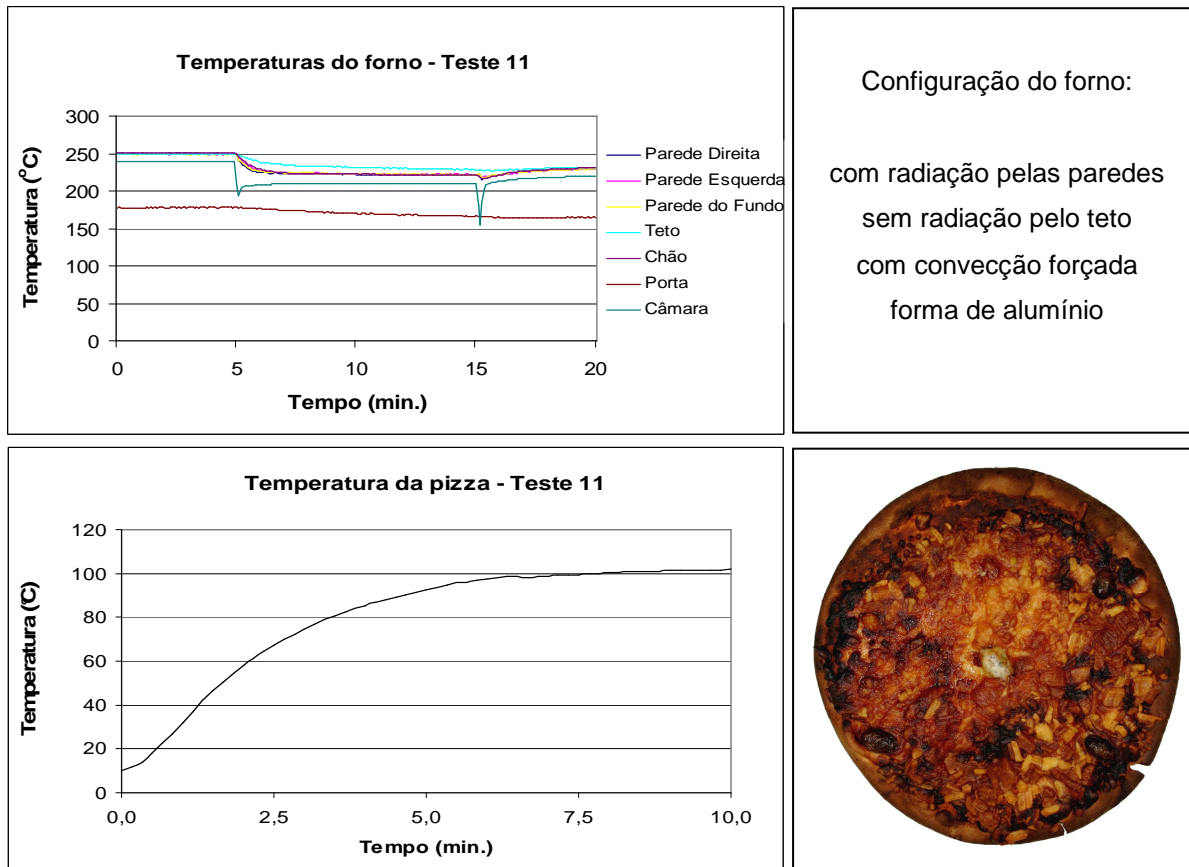
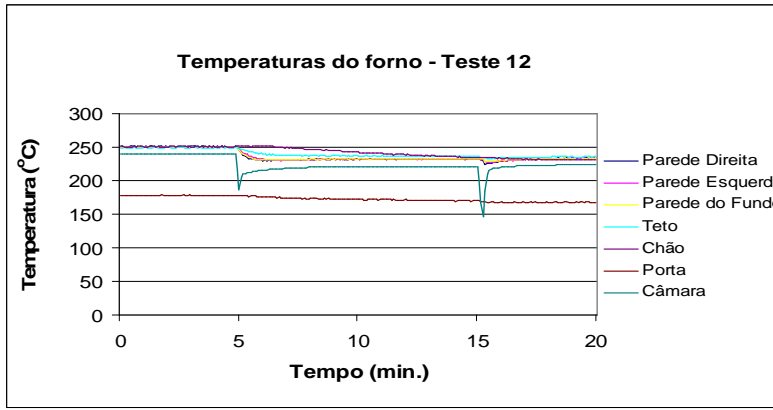


Figura D2.11 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 11 e pizza obtida sob esta condição.



Configuração do forno:
 com radiação pelas paredes
 sem radiação pelo teto
 com convecção forçada
 forma de pedra

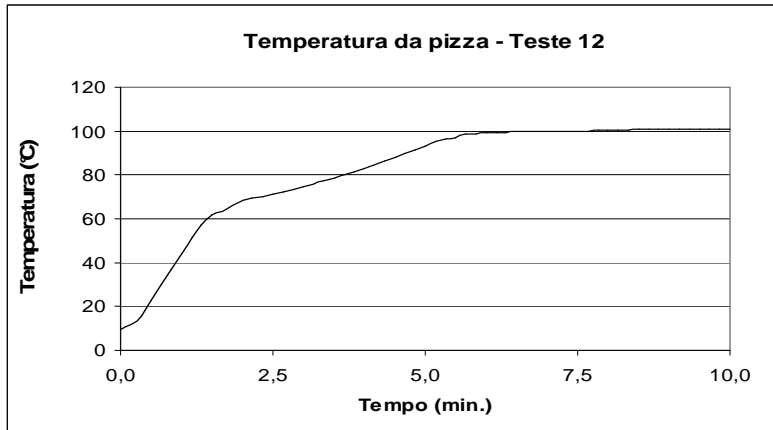
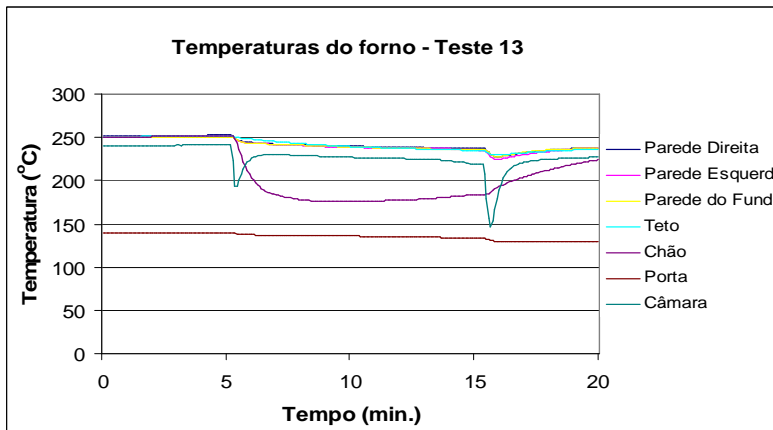


Figura D2.12 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 12 e pizza obtida sob esta condição.



Configuração do forno:
 com radiação pelas paredes
 com radiação pelo teto
 sem convecção forçada
 forma de alumínio

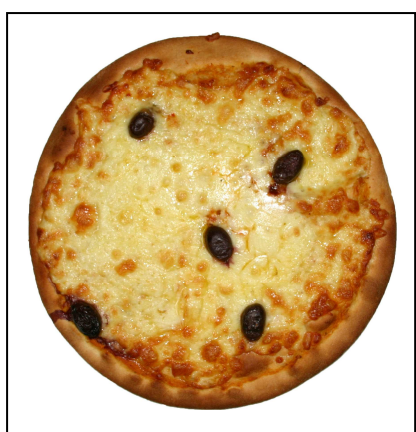
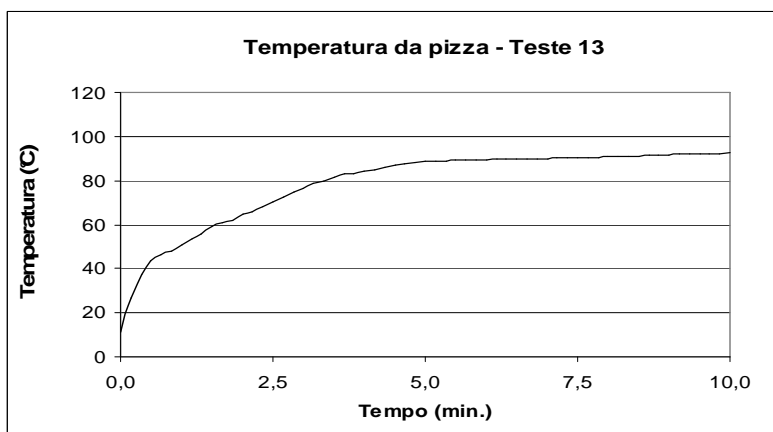
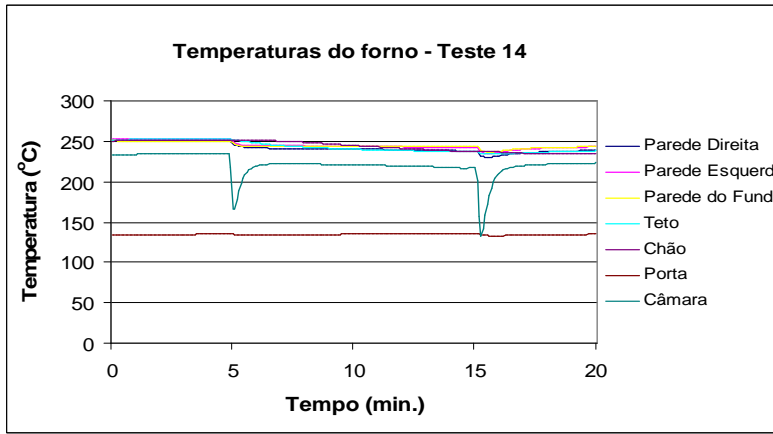


Figura D2.13 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 13 e pizza obtida sob esta condição.



Configuração do forno:
 com radiação pelas paredes
 com radiação pelo teto
 sem convecção forçada
 forma de pedra

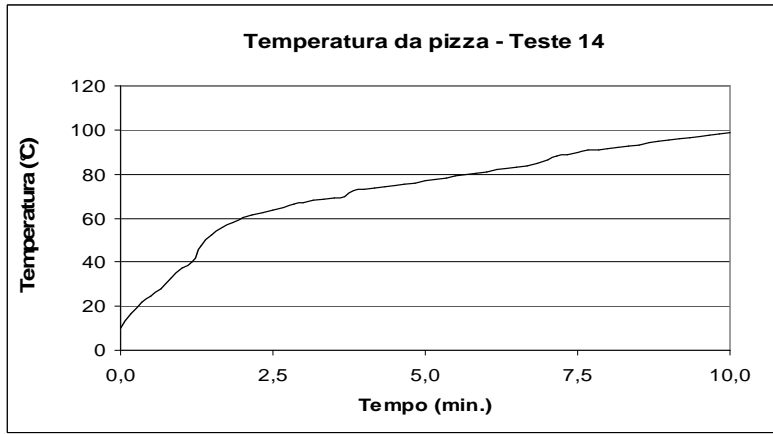
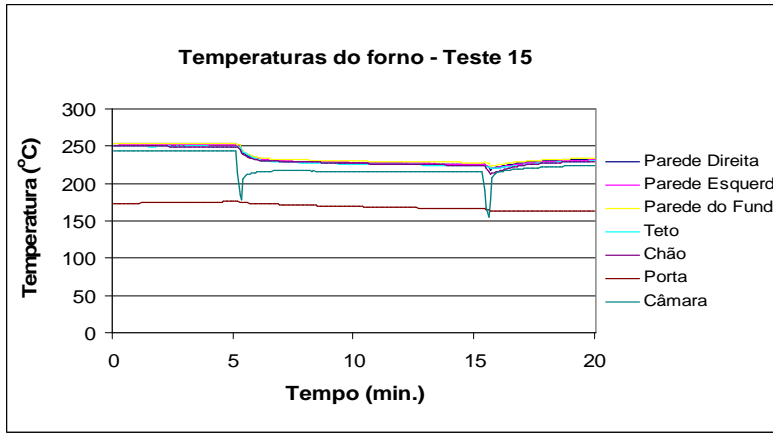


Figura D2.14 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 14 e pizza obtida sob esta condição.



Configuração do forno:
 com radiação pelas paredes
 com radiação pelo teto
 com convecção forçada
 forma de alumínio

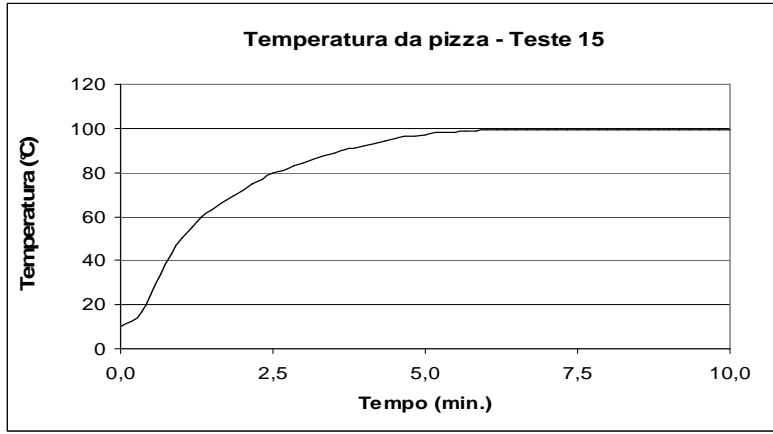


Figura D2.15 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 15 e pizza obtida sob esta condição.

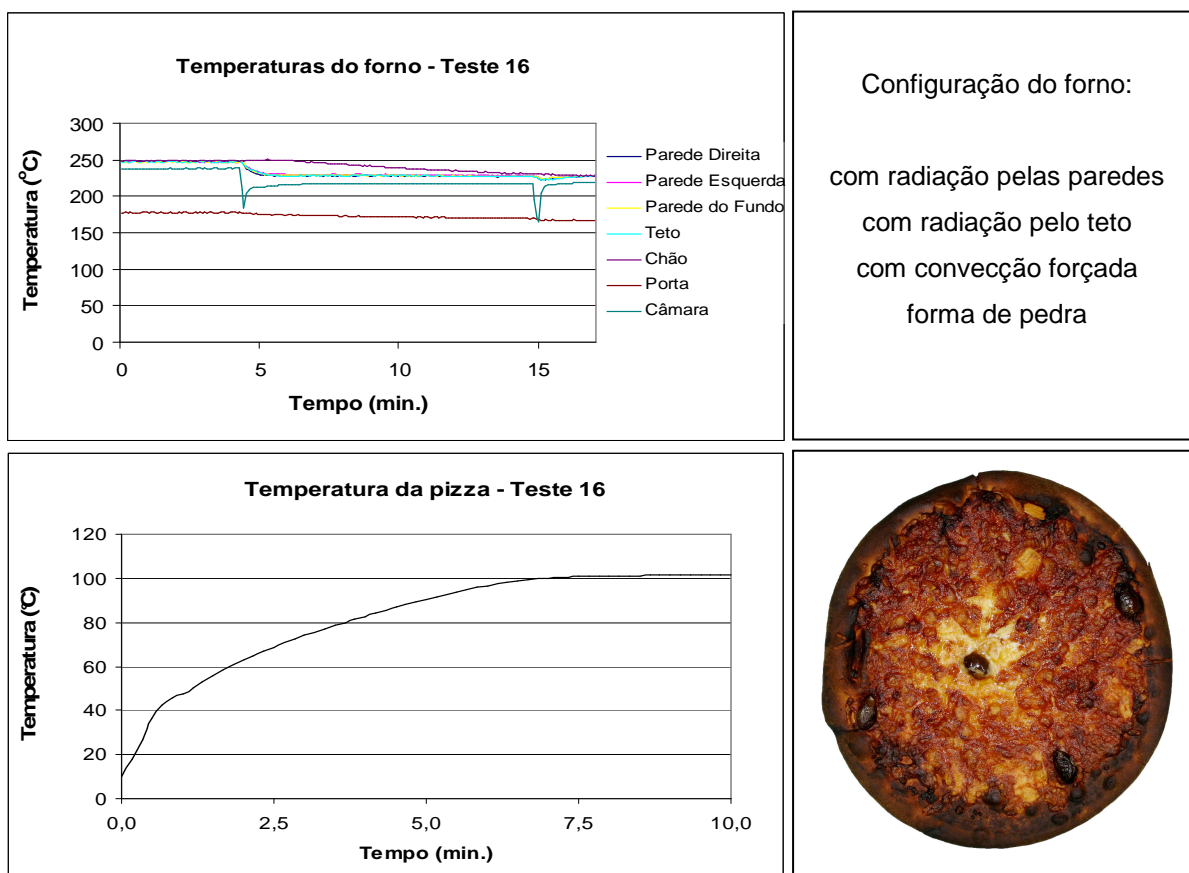


Figura D2.16 – Gráficos da temperatura do forno e da pizza plotados em função do tempo para o Teste 16 e pizza obtida sob esta condição.

Réplica dos testes

Teste 1



Teste 2



Teste 3



Teste 4



Teste 5



Teste 6



Teste 7



Teste 8



Teste 9



Teste 10



Teste 11



Teste 12



Teste 13



Teste 14



Teste 15



Teste 16

APÊNDICE D3 – ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DO FORNO NA QUALIDADE DA PIZZA: QUALIDADE SENSORIAL E REQUISITOS DE SEGURANÇA

D3.1 QUALIDADE SENSORIAL

As tabelas a seguir apresentam os dados obtidos durante o estudo da influência da configuração do forno sobre os atributos de qualidade da pizza.

Tabela D3.1 – Dados obtidos para a avaliação da cor da pizza, com a escala padrão de cor.

<i>Análise sensorial - Atributo: cor da pizza</i>																
Teste	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
Fatores		Combinação dos fatores														
<i>A</i>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>B</i>	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
<i>C</i>	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
<i>D</i>	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
Julgador		Resposta – Réplica 1														
1	8	8	15	15	8	8	16	16	9	8	15	15	8	8	16	15
2	8	8	15	15	7	8	15	16	8	8	14	15	8	8	15	14
3	7	9	15	16	8	7	15	16	8	8	16	16	8	7	16	16
4	8	8	15	16	8	8	15	15	8	7	15	15	8	8	15	15
5	9	8	15	15	8	7	16	15	8	8	15	16	8	8	15	15
6	8	7	15	15	9	8	15	15	8	8	16	15	8	8	15	15
7	9	8	16	15	8	9	15	15	8	8	16	15	7	8	15	16
8	8	8	16	15	8	8	15	15	8	8	15	16	9	8	16	15
9	8	7	15	15	8	8	15	15	8	8	15	15	8	8	15	16
10	7	8	15	16	8	9	16	16	7	8	16	15	9	9	16	15
Julgador		Resposta – Réplica 2														
1	8	8	15	15	8	8	16	16	7	8	15	15	8	8	16	15
2	8	8	15	15	7	8	16	16	8	8	14	15	8	8	15	16
3	8	9	15	16	8	8	15	16	8	8	16	16	8	8	15	16
4	8	8	15	16	8	8	15	15	8	7	15	16	8	8	15	15
5	8	8	15	15	8	7	15	15	8	8	15	16	8	8	15	15
6	8	7	15	15	8	8	15	15	8	8	16	15	8	8	15	15
7	8	8	16	15	8	9	15	15	8	8	16	15	7	8	15	16
8	8	8	16	15	8	8	15	15	8	8	15	16	8	8	16	15
9	8	8	15	15	8	8	15	15	8	8	15	15	8	8	15	15
10	8	8	15	16	8	9	16	15	7	8	16	15	9	7	16	15

Tabela D3.2 – Efeitos e coeficientes estimados para a cor da pizza e valor-p.

<i>Termo</i>	<i>Efeito</i>	<i>Coeficiente</i>	<i>SE_{coeficiente}</i>	<i>T</i>	<i>Valor-p</i>
(A) Radiação pelo teto	-0,0062	-0,0031	0,01138	-0,27	0,787
(B) Radiação pelas paredes	0,0437	0,0219	0,01138	1,92	0,074
(C) Convecção forçada	7,3313	3,6656	0,01138	322,05	0,000
(D) Material da forma	0,0063	0,0031	0,01138	0,27	0,787
AB	-0,0063	-0,0031	0,01138	-0,27	0,787
AC	0,0312	0,0156	0,01138	1,37	0,190
AD	-0,0437	-0,0219	0,01138	-1,92	0,074
BC	-0,0187	-0,0094	0,01138	-0,82	0,423
BD	-0,0187	-0,0094	0,01138	-0,82	0,423
CD	0,0188	0,0094	0,01138	0,82	0,423
ABC	-0,0438	-0,0219	0,01138	-1,92	0,074
ABD	-0,0437	-0,0219	0,01138	-1,92	0,074
ACD	-0,0062	-0,0031	0,01138	-0,27	0,787
BCD	-0,0312	-0,0156	0,01138	-1,37	0,190
ABCD	0,0188	0,0094	0,01138	0,82	0,423

Tabela D3.3 – Dados obtidos para a avaliação da textura da crosta da pizza, utilizando-se a escala-do-ideal (1–muito macia, 2–macia, 3–ideal, 4–dura, 5–muito dura).

<i>Análise sensorial - Atributo: textura da crosta</i>																
Teste	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
Fatores	Combinação dos fatores															
A	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
B	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
C	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
D	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
Julgador	Resposta – Réplica 1															
1	2	2	5	5	2	3	5	5	4	3	4	5	3	3	5	5
2	3	3	4	4	4	3	5	5	4	3	4	5	3	3	5	4
3	4	2	3	5	4	3	5	4	4	3	5	5	3	3	4	4
4	3	2	5	4	2	3	5	4	3	4	5	5	3	3	4	4
5	4	4	4	4	2	3	4	4	4	3	4	5	3	4	4	5
6	4	4	3	4	3	2	5	5	4	3	4	4	3	3	4	5
7	4	3	3	4	3	3	5	5	3	5	5	4	3	3	5	5
8	3	4	4	5	3	2	5	4	2	4	4	4	3	3	4	4
9	3	3	5	4	2	3	5	4	3	4	5	4	3	3	4	4
10	4	3	5	4	4	4	5	5	3	3	4	5	4	3	4	5
11	2	3	4	3	4	3	5	4	4	4	4	4	3	4	3	5
12	2	2	4	4	3	4	5	5	3	3	5	5	4	3	5	4

13	3	4	5	4	4	4	4	5	4	4	4	5	3	3	5	5
14	2	4	4	3	3	3	4	4	3	3	4	5	4	4	5	5
15	2	3	4	4	5	3	5	5	2	3	5	3	3	3	4	5
16	3	4	4	5	2	4	4	5	3	2	4	4	3	3	4	5
17	3	2	4	4	3	4	3	5	3	4	4	4	3	3	4	4
18	2	3	5	4	4	3	5	4	2	2	4	4	3	3	4	4
19	3	2	4	5	3	3	5	4	4	4	4	5	4	4	4	4
20	2	2	5	4	4	3	5	5	3	3	4	4	2	3	4	4
21	2	3	4	3	2	3	4	5	2	4	4	4	3	3	4	4
22	2	3	4	4	4	4	4	5	4	3	5	4	4	4	4	4
23	3	2	5	4	3	3	4	4	4	3	5	4	2	3	4	5
24	2	3	4	4	3	3	5	5	3	3	5	4	3	4	5	5
25	3	2	4	4	3	2	5	4	4	3	4	4	3	3	5	5

Julgador	Resposta – Réplica 2															
26	2	2	2	4	4	4	5	5	3	4	4	3	4	3	3	4
27	3	3	5	4	3	4	3	5	4	3	4	4	3	3	4	5
28	2	2	5	3	4	3	5	4	3	3	5	4	3	4	4	4
29	2	2	4	5	4	4	5	5	4	3	5	5	2	3	5	4
30	4	4	4	4	3	3	5	4	4	3	4	5	3	3	4	5
31	3	4	4	2	3	4	5	5	3	2	5	4	3	3	4	4
32	4	3	5	5	3	4	4	4	3	4	4	4	3	3	5	4
33	4	4	4	4	3	3	3	4	3	2	5	4	3	4	4	4
34	4	3	4	4	3	3	4	5	2	4	4	4	3	3	5	5
35	3	3	4	4	2	3	4	5	4	3	4	4	3	3	5	4
36	3	3	5	5	4	3	4	5	3	4	5	4	3	3	4	4
37	4	2	4	4	3	4	4	5	4	4	5	5	3	4	4	5
38	2	4	4	4	3	4	5	5	3	3	5	5	4	3	5	4
39	2	4	4	5	3	3	5	4	3	4	4	5	3	3	4	5
40	3	4	4	4	3	3	4	3	3	3	4	5	4	4	4	4
41	2	2	4	4	3	2	4	4	2	3	5	5	3	3	4	5
42	2	2	2	4	3	4	4	3	4	3	5	4	4	3	5	4
43	3	3	4	5	2	3	5	4	4	4	5	4	3	3	4	5
44	3	2	4	2	4	4	4	3	3	3	4	5	4	3	4	5
45	2	2	2	4	3	4	4	4	4	3	4	3	3	2	4	5
46	3	3	4	4	4	3	4	5	4	3	5	5	3	3	4	5
47	2	3	3	4	3	4	4	4	4	3	4	4	3	3	4	5
48	3	3	4	5	3	3	3	5	3	4	5	4	3	2	4	4
49	2	2	4	5	2	3	4	5	3	3	4	5	4	3	5	5
50	3	2	4	4	4	4	5	3	3	3	4	5	3	2	5	4

Tabela D3.4 – Análise de variância para os dados da Tabela D3.3.

<i>Análise de variância</i>					
Fonte	Graus de Liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	F	Valor-p
Efeito Principal	4	11,909	2,977	194,90	0,000
Interação de 2ª ordem	6	0,442	0,074	4,82	0,006
Interação de 3ª ordem	4	0,038	0,009	0,63	0,652
Interação de 4ª ordem	1	0,018	0,018	1,18	0,294
Blocos (pizza)	1	0,018	0,018	1,18	0,294
Erro	15	0,229	0,015		
Total	31				

Tabela D3.5 – Efeitos e coeficientes estimados para a textura da crosta e valor-p.

<i>Termo</i>	<i>Efeito</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>SE_{coeficiente}</i>	<i>T</i>	<i>Valor-p</i>
(A) Radiação pelo teto	0,1675	0,0838	0,02185	3,83	0,002
(B) Radiação pelas paredes	0,1575	0,0788	0,02185	3,60	0,003
(C) Convecção forçada	1,1975	0,5988	0,02185	27,40	0,000
(D) Material da forma	0,0425	0,0213	0,02185	0,97	0,346
AB	-0,2275	-0,1138	0,02185	-5,21	0,000
AC	-0,0275	-0,0138	0,02185	-0,63	0,539
AD	-0,0125	-0,0063	0,02185	-0,29	0,779
BC	0,0325	0,0163	0,02185	0,74	0,469
BD	0,0375	0,0188	0,02185	0,86	0,404
CD	0,0075	0,0038	0,02185	0,17	0,866
ABC	0,0375	0,0187	0,02185	0,86	0,404
ABD	0,0325	0,0162	0,02185	0,74	0,469
ACD	0,0425	0,0212	0,02185	0,97	0,346
BCD	0,0225	0,0112	0,02185	0,51	0,614
ABCD	0,0475	0,0238	0,02185	1,09	0,294

Tabela D3.6 – Dados obtidos na avaliação da perda de água pela pizza durante a cocção.

Teste	Combinação dos fatores				Peso (g)					
	A	B	C	D	Réplica 1		Réplica 2		Réplica 3	
					Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
T1	-1	-1	-1	-1	514,7	479,5	484,8	452,8	523,6	489,6
T2	-1	-1	-1	1	505,0	469,9	494,7	459,2	499,6	463,1
T3	-1	-1	1	-1	494,4	425,8	482,6	411,9	486,8	416,2
T4	-1	-1	1	1	481,2	413,8	481,3	412,2	511,4	438,3
T5	-1	1	-1	-1	537,2	497,5	525,8	488,0	517,9	481,6
T6	-1	1	-1	1	516,4	478,7	524,8	486,5	495,6	460,9
T7	-1	1	1	-1	500,9	425,5	546,2	470,2	510,2	434,7
T8	-1	1	1	1	531,5	454,6	543,6	465,3	492,6	420,7
T9	1	-1	-1	-1	495,5	459,4	548,4	508,9	520,6	481,6
T10	1	-1	-1	1	483,6	448,3	548,4	507,8	512,9	473,9
T11	1	-1	1	-1	523,3	447,5	553,0	472,0	523,8	449,4
T12	1	-1	1	1	506,9	434,2	476,6	407,3	498,7	427,4
T13	1	1	-1	-1	525,9	483,2	544,4	500,2	514,7	472,0
T14	1	1	-1	1	498,0	459,4	513,1	472,3	494,2	454,2
T15	1	1	1	-1	527,4	445,7	530,2	447,8	516,3	437,3
T16	1	1	1	1	515,4	437,6	517,7	438,7	498,1	421,4

Tabela D3.7 – Análise de variância para os dados da Tabela D3.6

<i>Análise de variância</i>					
Fonte	Graus de Liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	F	Valor-p
Efeito Principal	4	640,747	160,187	2854,27	0,000
Interação de 2ª ordem	6	1,358	0,226	4,03	0,004
Interação de 3ª ordem	4	0,238	0,059	1,06	0,393
Interação de 4ª ordem	1	0,018	0,018	0,31	0,580
Erro	32	1,796	0,056		
Total	47	644,156			

Tabela D3.8 - Efeitos e coeficientes estimados para a perda de água e valor-p.

<i>Termo</i>	<i>Efeito</i>	<i>Coeficiente</i>	<i>SE_{coeficiente}</i>	<i>T</i>	<i>Valor-p</i>
(A) Radiação pelo teto	0,5737	0,2868	0,03419	8,39	0,000
(B) Radiação pelas paredes	0,5408	0,2704	0,03419	7,91	0,000
(C) Convecção forçada	7,2646	3,6323	0,03419	106,23	0,000
(D) Material da forma	-0,0117	-0,0058	0,03419	-0,17	0,865
AB	0,2606	0,1303	0,03419	3,81	0,001
AC	-0,1009	-0,0504	0,03419	-1,48	0,150
AD	-0,0835	-0,0418	0,03419	-1,22	0,231
BC	0,0528	0,0264	0,03419	0,77	0,446
BD	-0,1207	-0,0603	0,03419	-1,76	0,087
CD	-0,1036	-0,0518	0,03419	-1,52	0,140
ABC	0,0746	0,0373	0,03419	1,09	0,284
ABD	-0,0029	-0,0015	0,03419	-0,04	0,966
ACD	0,0776	0,0388	0,03419	1,14	0,265
BCD	0,0906	0,0453	0,03419	1,33	0,194
ABCD	-0,0383	-0,0191	0,03419	-0,56	0,580

D3.2 REQUISITOS DE SEGURANÇA

As Tabelas D3.10 e D3.11 apresentam os dados de temperatura em função do tempo no interior da massa de pizza obtidos sob as diferentes configurações do forno testadas e utilizados nos cálculos dos parâmetros de segurança microbiológica.

Tabela D3.9 - Análise de variância para os dados obtidos para a avaliação do número de reduções decimais.

<i>Análise de variância</i>					
<i>Fonte</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Soma Quadrática</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>F</i>	<i>Valor-p</i>
Efeito Principal	4	3457,49	864,373	1592,98	0,000
Interação de 2ª ordem	6	3,96	0,660	1,22	0,348
Interação de 3ª ordem	4	2,99	0,746	1,38	0,286
Interação de 4ª ordem	1	0,00	0,000	0,00	0,978
Erro	16	8,68	0,543		
Total	31	3473,12			

Tabela D3.10 – Temperatura no interior da massa de pizza, durante a cocção, para as diferentes configurações do forno. (Réplica 1).

<i>Tempo (min.)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>															
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
0,00	10,04	9,70	9,62	9,59	12,10	10,55	9,94	9,54	12,30	10,94	10,06	9,50	10,99	10,13	9,90	9,77
0,17	14,03	23,00	16,32	18,43	16,25	14,85	24,07	13,83	16,45	13,67	11,56	11,65	26,72	16,71	12,42	17,82
0,33	15,47	32,65	25,03	21,38	25,09	19,70	35,28	21,35	25,29	17,52	14,28	15,91	37,49	21,97	16,53	27,04
0,50	17,16	38,55	32,76	24,32	32,48	24,12	46,77	30,04	32,68	21,37	17,91	22,49	43,34	24,44	24,29	36,01
0,67	18,95	42,38	38,88	27,75	37,93	27,80	53,10	37,75	38,13	24,74	22,26	29,68	46,43	27,74	34,23	42,55
0,83	20,77	44,88	43,40	31,34	41,87	30,83	55,80	44,79	42,07	27,64	27,06	37,10	47,88	32,89	42,93	45,79
1,00	22,56	46,55	47,30	34,69	44,81	33,21	59,16	50,38	45,01	30,18	32,02	44,18	50,88	37,25	50,03	47,66
1,17	24,28	47,76	50,96	37,70	47,14	34,99	60,23	56,11	47,34	32,41	37,01	51,31	53,36	40,09	55,45	50,12
1,33	25,95	48,66	54,53	40,28	49,05	36,78	62,51	59,74	49,25	34,37	41,84	56,92	55,87	47,27	59,71	53,29
1,50	27,55	49,40	57,92	43,10	50,68	37,89	65,12	63,31	50,88	36,12	46,39	61,55	59,17	52,24	63,23	56,08
1,67	29,10	50,06	61,15	45,38	52,14	39,23	67,60	66,90	52,34	37,74	50,60	63,24	60,87	55,80	66,32	58,47
1,83	30,58	50,69	64,17	48,74	53,50	40,53	69,79	69,21	53,70	39,28	54,49	66,39	61,87	58,21	69,23	60,70
2,00	32,07	51,31	66,78	51,72	54,73	41,73	70,70	71,69	54,93	40,78	58,07	68,47	64,87	60,03	71,95	62,92
2,17	33,49	51,95	69,02	54,74	55,91	42,80	73,60	73,90	56,11	42,31	61,34	69,26	65,77	61,50	74,61	64,97
2,33	34,83	52,65	70,98	56,40	57,05	43,82	75,90	75,65	57,25	43,80	64,34	70,12	67,91	62,72	77,13	66,93
2,50	36,22	53,36	74,61	59,96	58,13	44,79	78,98	77,69	58,33	45,24	67,20	71,35	70,12	63,77	79,56	68,90
2,67	37,91	54,07	75,75	62,43	59,21	45,72	81,23	78,10	59,41	46,72	69,88	72,51	72,36	64,66	80,87	70,78
2,83	41,10	54,83	77,61	66,09	60,24	46,61	82,68	78,86	60,44	48,18	72,43	73,35	74,63	66,49	83,05	72,51
3,00	44,60	55,65	79,12	68,69	61,28	47,50	84,45	80,24	61,48	49,62	74,74	74,65	76,50	67,25	84,42	74,05
3,17	47,48	56,47	80,43	71,72	62,29	48,40	85,74	81,92	62,49	51,04	76,85	75,93	78,56	67,98	85,94	75,54
3,33	50,43	57,36	81,49	74,31	63,30	49,30	87,29	84,04	63,50	52,43	78,85	77,24	79,95	68,65	87,43	77,02
3,50	53,42	58,29	82,31	76,61	64,28	50,23	88,73	84,90	64,48	53,85	80,69	78,56	81,56	69,25	88,84	78,52
3,67	56,17	59,28	83,31	78,40	65,27	51,25	89,64	86,59	65,47	55,27	82,41	79,98	82,95	69,88	90,17	80,01
3,83	58,66	60,29	84,44	80,54	66,22	52,38	90,49	88,40	66,42	56,70	83,94	81,56	83,39	72,52	90,95	81,45
4,00	60,98	61,35	85,56	83,80	67,14	53,59	91,36	89,40	67,34	58,13	85,36	83,03	84,31	73,07	92,13	82,85
4,17	63,10	62,42	86,72	85,68	68,08	54,84	91,75	90,97	68,28	59,49	86,73	84,76	84,92	73,68	93,27	84,22
4,33	65,03	63,51	87,90	87,36	68,96	56,10	92,08	91,62	69,16	60,85	88,00	86,27	85,69	74,24	94,36	85,60
4,50	66,77	64,62	89,16	88,81	69,91	57,36	92,15	93,04	70,11	62,36	89,27	88,11	87,19	74,86	95,45	86,94
4,67	68,39	65,76	89,62	90,64	70,84	58,67	92,95	94,55	71,04	64,05	90,40	89,74	87,77	75,50	96,34	88,20
4,83	69,84	66,90	90,40	92,10	71,73	59,99	93,72	96,20	71,93	65,83	91,46	91,52	88,28	76,18	96,51	89,48
5,00	71,15	68,06	91,33	93,10	72,63	61,25	94,42	96,78	72,83	68,34	92,45	93,06	88,53	76,89	97,36	90,57

Tabela D3.10 (continuação) – Temperatura no interior da pizza, durante a cocção, para as diferentes configurações do forno.(Réplica 1).

<i>Tempo (min.)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>															
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
5,17	71,95	69,18	92,40	94,42	73,52	62,38	95,03	97,28	73,72	70,42	93,44	95,13	88,69	77,59	98,16	91,66
5,33	72,66	70,36	93,57	95,61	74,40	63,68	95,36	98,03	74,60	73,86	95,00	96,64	88,88	78,31	98,23	92,71
5,50	73,34	71,49	94,72	96,73	75,26	64,97	96,06	98,50	75,46	75,71	95,67	97,20	89,06	79,06	98,32	93,74
5,67	74,13	72,61	95,79	97,43	76,07	66,24	96,76	99,02	76,27	77,44	96,15	98,57	89,27	79,77	98,58	94,79
5,83	74,95	73,71	96,30	97,92	76,87	67,52	97,45	99,32	77,07	78,74	96,88	98,76	89,38	80,46	98,96	95,72
6,00	75,71	74,79	96,75	98,03	77,67	68,80	97,54	99,36	77,87	79,77	97,69	99,00	89,50	81,19	99,26	96,64
6,17	76,52	75,88	96,93	98,32	78,45	70,11	97,92	99,47	78,65	80,65	98,12	99,18	89,62	81,97	99,46	97,43
6,33	77,30	76,96	97,27	98,61	79,19	71,40	98,37	99,56	79,39	81,44	98,47	99,43	89,78	82,68	99,28	98,16
6,50	78,12	77,94	97,91	98,75	79,94	72,69	98,93	99,58	80,14	82,17	98,81	99,80	89,95	82,96	99,34	98,80
6,67	78,92	78,93	98,44	99,41	80,68	73,94	99,45	99,62	80,88	82,90	98,02	99,64	89,96	83,53	99,40	99,32
6,83	79,75	79,90	98,97	99,62	81,44	75,19	99,97	99,65	81,64	83,63	98,47	99,79	90,02	84,92	99,41	99,81
7,00	80,56	80,88	99,41	99,90	82,20	76,45	100,00	99,68	82,40	84,38	98,75	99,97	90,13	86,59	99,41	100,17
7,17	81,31	81,78	99,82	100,05	82,96	77,71	100,03	99,70	83,16	85,12	99,02	99,91	90,21	87,92	99,41	100,34
7,33	82,06	82,67	99,94	100,14	83,70	78,99	100,06	99,73	83,90	85,85	99,30	99,95	90,32	89,00	99,40	100,45
7,50	82,79	83,53	100,17	100,18	84,45	80,28	100,09	99,76	84,65	86,56	99,52	100,00	90,51	89,81	99,43	100,91
7,67	83,50	84,40	100,28	100,20	85,20	81,59	100,12	99,79	85,40	87,24	99,69	100,07	90,55	90,72	99,44	101,05
7,83	84,26	85,24	100,37	100,34	85,92	82,89	100,15	99,82	86,12	87,90	99,97	100,19	90,59	90,76	99,43	101,16
8,00	84,99	86,06	100,44	100,49	86,66	84,17	100,18	99,85	86,86	88,54	100,23	100,23	90,75	91,42	99,44	101,20
8,17	85,74	86,87	100,52	100,50	87,40	85,47	100,21	99,87	87,60	89,14	100,43	100,33	90,90	92,12	99,44	101,24
8,33	86,51	87,64	100,57	100,60	88,08	86,76	100,25	99,90	88,28	89,77	100,66	100,49	91,03	92,79	99,44	101,27
8,50	87,29	88,42	100,59	100,68	88,76	87,98	100,30	99,93	88,96	90,37	100,85	100,67	91,16	93,46	99,43	101,30
8,67	88,08	89,19	100,65	100,71	89,49	89,17	100,36	99,96	89,69	90,97	101,15	100,70	91,32	94,10	99,43	101,32
8,83	88,87	89,92	100,70	100,79	90,20	90,32	100,43	100,00	90,40	91,54	101,18	100,72	91,47	94,70	99,44	101,32
9,00	89,67	90,68	100,71	100,80	90,92	91,37	100,51	100,03	91,12	92,12	101,43	100,74	91,64	95,36	99,44	101,34
9,17	90,50	91,40	100,78	100,82	91,62	92,45	100,60	100,04	91,82	92,67	101,43	100,76	91,84	95,93	99,43	101,38
9,33	91,35	92,14	100,85	100,84	92,27	93,41	100,70	100,09	92,47	93,24	101,58	100,78	91,96	96,41	99,43	101,39
9,50	92,21	92,88	100,70	100,87	92,81	94,32	100,81	100,11	93,01	93,80	101,66	100,85	92,09	96,98	99,43	101,38
9,67	93,04	93,27	100,77	100,90	93,29	95,19	100,93	100,22	93,49	94,34	101,65	100,91	92,23	97,70	99,43	101,39
9,83	93,88	93,96	100,88	100,94	93,63	95,97	101,06	100,27	93,83	94,87	101,73	100,93	92,37	98,24	99,42	101,41
10,00	94,72	94,89	100,95	100,97	93,87	96,63	101,09	100,33	94,07	95,40	101,82	100,95	92,52	98,83	99,43	101,39

Tabela D3.11 – Temperatura no interior da massa de pizza, durante a cocção, para as diferentes configurações do forno. (Réplica 2).

Tempo (min.)	Temperatura (°C)															
	T1.2	T2.2	T3.2	T4.2	T5.2	T6.2	T7.2	T8.2	T9.2	T10.2	T11.2	T12.2	T13.2	T14.2	T15.2	T16.2
0,00	9,81	10,49	10,13	10,06	10,10	10,30	10,39	10,12	10,04	9,94	10,45	10,79	9,85	10,30	9,64	9,80
0,17	10,80	16,22	25,96	12,06	16,30	17,20	15,43	17,82	14,67	13,32	13,05	15,30	12,90	14,25	13,28	13,37
0,33	12,24	23,99	36,22	14,78	25,10	26,04	18,38	26,53	18,52	16,42	17,10	25,00	17,72	17,90	21,80	18,48
0,50	13,93	28,99	41,94	18,41	32,50	33,43	21,32	34,96	22,37	19,50	21,89	34,71	22,20	23,80	30,49	27,24
0,67	15,72	31,99	45,24	22,76	37,98	38,88	24,75	39,98	25,74	21,66	29,08	40,89	25,75	27,63	38,20	38,18
0,83	17,54	34,99	49,39	27,56	41,90	42,82	28,34	43,90	28,64	23,54	36,50	44,90	28,85	30,66	45,24	42,88
1,00	19,33	36,99	52,75	32,52	44,90	45,76	31,69	47,80	31,18	25,62	43,58	48,19	31,22	32,70	50,83	47,98
1,17	21,05	39,10	56,59	37,51	47,20	48,09	34,70	51,46	33,41	27,58	50,71	50,70	33,03	34,68	56,56	52,63
1,33	22,72	41,99	60,77	42,34	49,15	50,00	37,28	55,03	35,37	29,54	56,32	52,80	34,98	36,78	60,19	56,89
1,50	24,32	44,26	64,74	46,89	50,69	51,63	39,10	58,42	37,12	31,57	60,95	56,00	38,91	38,88	63,76	60,41
1,67	25,87	46,87	68,30	51,10	52,15	53,09	42,38	61,65	38,74	33,39	64,64	57,97	40,22	40,77	67,35	63,50
1,83	27,35	48,51	70,71	54,99	53,50	54,45	45,74	64,67	40,28	36,65	67,79	60,50	41,59	42,52	69,66	66,41
2,00	28,84	50,28	72,53	58,57	54,89	55,68	48,72	67,28	41,78	37,57	69,87	62,72	42,86	45,11	72,14	69,13
2,17	30,26	52,27	74,00	61,84	55,98	56,86	51,74	69,52	43,31	39,72	70,66	64,77	43,87	46,61	74,35	71,79
2,33	31,60	54,41	75,46	64,84	57,10	58,00	54,40	71,48	44,80	41,52	72,25	66,73	44,90	49,12	76,10	74,31
2,50	33,99	56,62	77,17	67,70	58,17	59,08	56,96	73,11	46,24	43,33	73,32	68,70	45,86	50,54	77,14	76,74
2,67	35,62	59,86	79,16	70,38	59,31	60,16	59,43	75,25	47,72	45,37	74,61	70,58	46,71	52,56	77,19	79,05
2,83	37,87	62,63	80,69	72,93	60,34	61,19	62,09	75,81	49,18	47,47	75,55	72,31	47,62	54,34	77,71	81,23
3,00	41,37	64,50	81,75	75,24	61,26	62,23	64,69	77,32	50,62	50,28	76,64	73,85	48,62	56,99	78,55	82,60
3,17	44,25	66,56	83,15	77,35	62,32	63,24	67,72	78,63	52,04	51,21	77,83	75,34	49,49	58,77	78,87	84,12
3,33	47,20	68,95	83,25	79,35	63,28	64,25	70,31	79,69	53,43	52,54	79,14	76,82	50,87	60,46	80,99	85,61
3,50	50,19	71,06	83,75	81,19	64,35	65,23	72,61	80,51	54,85	54,11	80,46	78,32	51,75	62,96	82,35	87,02
3,67	52,94	72,45	84,38	82,91	65,57	66,22	75,40	81,51	56,27	56,21	81,88	79,81	52,82	64,68	84,04	88,35
3,83	55,43	75,31	85,02	84,44	66,22	67,17	77,54	82,64	57,70	56,99	83,46	81,25	53,94	66,28	85,85	89,63
4,00	57,75	76,64	85,57	85,86	67,24	68,09	78,97	83,76	59,13	59,33	84,93	82,65	55,12	68,47	87,85	90,21
4,17	59,87	78,42	86,18	87,23	68,18	69,03	80,68	84,92	60,49	60,10	86,66	84,02	56,39	70,33	89,64	90,92
4,33	61,80	80,69	86,74	88,50	69,02	69,91	82,36	86,10	61,85	61,52	88,17	85,31	57,63	71,43	91,07	92,01
4,50	63,54	82,69	87,36	89,77	69,92	70,86	83,81	87,36	63,46	63,07	90,01	86,65	58,93	72,52	92,49	93,10
4,67	65,16	83,77	88,36	90,90	70,79	71,79	85,64	88,32	65,15	64,65	90,64	87,91	61,24	73,39	94,00	93,46
4,83	66,34	84,78	89,18	91,96	71,70	72,68	87,10	89,10	66,93	65,97	91,92	89,19	62,58	74,14	95,96	94,49
5,00	67,65	85,06	90,70	92,95	72,69	73,58	88,10	90,03	69,44	67,48	92,96	90,28	63,81	74,50	96,88	95,51

Tabela D3.11 (continuação) – Temperatura no interior da pizza, durante a cocção, para as diferentes configurações do forno. (Réplica 2).

<i>Tempo (min.)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>															
	T1.2	T2.2	T3.2	T4.2	T5.2	T6.2	T7.2	T8.2	T9.2	T10.2	T11.2	T12.2	T13.2	T14.2	T15.2	T16.2
5,17	68,45	85,24	91,09	93,94	73,62	74,47	89,42	91,10	71,52	68,81	94,53	91,37	64,90	76,00	97,73	96,38
5,33	69,16	85,43	91,31	95,50	74,45	75,35	90,61	92,27	73,06	70,51	96,04	92,42	66,22	76,77	98,48	97,11
5,50	70,59	85,61	92,06	96,17	75,30	76,21	91,73	93,42	74,91	72,12	97,50	93,45	67,52	77,14	98,95	97,77
5,67	71,63	85,82	92,77	96,65	76,17	77,02	92,93	94,49	76,64	73,76	97,76	94,50	68,80	77,58	99,05	98,35
5,83	72,45	85,93	93,46	97,38	76,97	77,82	93,92	95,54	77,94	75,17	98,16	95,43	70,40	78,49	99,13	98,66
6,00	73,21	86,05	94,19	98,19	77,72	78,62	94,82	96,49	78,97	76,49	98,40	96,35	71,52	80,29	99,17	98,96
6,17	74,02	86,17	94,47	98,62	78,51	79,40	96,03	97,43	79,85	77,44	98,58	97,14	72,68	81,00	99,36	99,16
6,33	75,30	86,33	95,38	98,97	79,20	80,14	96,81	97,77	80,64	78,34	98,83	97,87	73,94	82,11	99,44	99,28
6,50	76,12	86,51	95,76	99,31	79,98	80,89	97,75	98,41	81,37	79,53	99,04	98,57	75,23	83,22	99,49	99,39
6,67	78,45	86,50	96,03	98,52	81,02	81,63	98,41	98,94	82,10	80,88	99,19	99,09	76,49	84,33	99,55	99,50
6,83	79,28	86,57	96,92	98,97	81,92	82,39	99,12	99,47	82,83	81,22	99,20	99,58	77,69	84,83	99,61	99,56
7,00	80,09	86,68	97,52	99,25	82,26	83,15	99,50	99,91	83,58	82,23	99,37	99,94	78,94	85,94	99,67	99,61
7,17	80,84	86,76	98,93	99,27	82,98	83,91	99,68	100,32	84,32	82,94	99,51	100,29	80,21	87,21	99,73	99,66
7,33	81,59	86,87	99,27	99,55	83,90	84,65	99,90	100,64	85,05	83,70	99,60	100,53	81,49	88,32	99,79	99,70
7,50	82,32	87,06	99,37	99,77	84,56	85,40	99,94	100,87	85,76	84,46	99,69	100,68	82,78	89,12	99,85	99,78
7,67	83,03	87,10	99,52	99,89	85,40	86,15	99,96	100,98	86,44	85,33	99,78	100,82	84,09	89,35	99,91	99,87
7,83	83,79	87,14	99,86	100,07	85,98	86,87	100,12	101,07	87,10	86,19	99,87	100,93	85,39	89,90	99,97	99,93
8,00	84,52	87,30	100,09	100,33	86,96	87,61	100,21	101,14	87,74	86,87	99,96	100,97	85,67	90,46	100,03	100,01
8,17	85,27	87,45	100,22	100,53	87,59	88,35	100,32	101,22	88,34	87,72	100,05	101,01	86,97	91,05	100,09	100,08
8,33	86,04	87,58	100,49	100,76	88,28	89,03	100,47	101,27	88,97	88,50	100,14	101,04	88,26	91,61	100,15	100,15
8,50	86,82	87,71	100,72	100,85	88,86	89,71	100,51	101,09	89,57	89,31	100,23	101,07	89,48	92,17	100,21	100,21
8,67	87,61	87,87	100,86	101,15	89,59	90,44	100,68	101,15	90,17	90,14	100,32	101,09	90,67	92,75	100,27	100,28
8,83	88,40	88,02	101,12	101,18	90,40	91,15	100,73	101,20	90,74	90,89	100,41	101,09	91,82	93,33	100,33	100,36
9,00	89,20	88,19	101,21	101,43	90,92	91,87	100,89	101,21	91,32	91,57	100,50	101,11	92,87	93,98	100,39	100,43
9,17	90,03	88,39	101,37	101,43	91,72	92,57	100,92	101,28	91,87	92,42	100,59	101,15	93,95	94,53	100,45	100,49
9,33	90,88	88,51	101,54	101,58	92,37	93,22	101,00	101,35	92,44	93,23	100,68	101,16	94,91	94,88	100,49	100,56
9,50	91,74	88,64	101,59	101,66	93,10	93,76	101,09	101,40	93,00	94,05	100,77	101,15	95,82	95,33	100,53	100,63
9,67	92,57	88,78	101,73	101,65	93,98	94,24	101,13	101,47	93,54	94,88	100,86	101,16	96,69	95,96	100,57	100,70
9,83	93,41	88,92	101,77	101,73	94,12	94,58	101,26	101,58	94,07	96,19	100,95	101,18	97,47	96,41	100,61	100,76
10,00	94,25	89,07	101,82	101,82	94,23	94,82	101,37	101,65	94,60	96,62	101,04	101,16	98,13	96,96	100,65	100,92

APÊNDICE D4 – DETERMINAÇÃO DAS MELHORES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO FORNO PARA A COCÇÃO DA PIZZA

As Figuras D4.1, D4.2 e D4.3 referem-se às imagens das pizzas obtidas pela cocção em diferentes condições de operação do protótipo do forno.



Teste 150°C.5Hz.3min.



Teste 150°C.5Hz.5min.



Teste 1 50°C.5Hz.10min.



Teste 150°C.20Hz.3min.



Teste 150°C.20Hz.5min.



Teste 150°C.20Hz.10min.



Teste 150°C.35Hz.3min.



Teste 150°C.35Hz.5min



Teste 150°C.35Hz.10min

Figura D4.1 – Pizzas assadas no protótipo a 150°C, em diferentes velocidades do ventilador e tempo de cocção.



Teste 250°C.5Hz.3min.



Teste 250°C.5Hz.5min.



Teste 250°C.5Hz.10min.



Teste 250°C.20Hz.3min.



Teste 250°C.20Hz.5min.



Teste 250°C.20Hz.10min.



Teste 250°C.35Hz.3min.



Teste 250°C.35Hz.5min



Teste 250°C.35Hz.10min

Figura D4.2 – Pizzas assadas no protótipo a 250°C, em diferentes velocidades do ventilador e tempo de cocção.



Teste 350°C.5Hz.3min.



Teste 350°C.5Hz.5min.



Teste 3 50°C.5Hz.10min.



Teste 350°C.20Hz.3min.



Teste 350°C.20Hz.5min.

Figura D4.3 – Pizzas assadas no protótipo a 350°C, em diferentes velocidades do ventilador e tempo de cocção.

As Tabelas D4.1 e D4.2 apresentam os dados da análise sensorial realizada para a avaliação da cor das pizzas e da textura da borda.

As Tabelas D4.3, D4.4 e D4.5 referem-se às temperaturas obtidas no interior da massa da pizza para os tempos de cocção de 3, 5 e 10 minutos, respectivamente. Essas temperaturas foram utilizadas para o cálculo dos parâmetros de segurança microbiológica.

Tabela D4.3 – Temperatura no interior da massa de pizza para t=3 minutos.

<i>Tempo (min.)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>							
	T111	T121	T131	T211	T221	T231	T311	T321
0,00	9,83	10,28	10,71	10,09	10,32	9,50	9,39	9,87
0,17	11,38	12,69	13,39	11,56	13,29	20,30	14,16	20,20
0,33	13,51	15,31	16,55	13,45	15,23	32,31	22,41	32,75
0,50	15,88	17,53	19,64	15,56	17,48	40,17	30,66	42,04
0,67	18,26	19,75	22,80	17,92	19,62	44,81	37,93	51,84
0,83	20,55	22,00	24,61	19,88	21,39	47,59	43,98	59,80
1,00	22,59	23,73	26,53	21,22	23,92	49,63	49,04	65,83
1,17	24,44	25,45	29,29	22,90	27,80	51,22	53,57	70,61
1,33	26,07	26,87	32,28	25,14	34,11	52,73	57,49	74,28
1,50	27,51	28,38	35,33	27,67	41,97	54,22	60,36	76,96
1,67	28,83	29,85	37,72	30,01	48,19	55,15	62,51	79,05
1,83	30,09	31,17	41,29	32,37	53,32	56,80	64,25	80,88
2,00	31,25	32,71	44,64	34,62	57,24	58,38	66,48	82,52
2,17	32,35	34,15	47,08	36,60	61,35	60,05	68,69	84,14
2,33	33,41	35,44	49,94	38,44	65,05	61,74	71,02	85,69
2,50	34,45	37,03	52,82	40,28	68,77	63,54	73,48	87,21
2,67	35,45	38,31	56,67	42,86	72,03	65,44	75,93	88,84
2,83	36,45	39,89	59,35	44,62	75,17	67,32	78,25	90,60
3,00	36,83	41,28	62,79	46,88	77,95	68,18	79,77	92,22

Tabela D4.4– Temperatura no interior da massa de pizza para t =5 minutos.

<i>Tempo (min.)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>							
	T112	T122	T132	T212	T222	T232	T312	T322
0,00	9,38	9,73	9,88	10,02	10,24	11,25	9,99	9,63
0,17	13,34	11,97	11,76	14,24	13,11	19,97	12,43	38,98
0,33	18,25	14,93	13,75	20,74	15,41	25,13	17,61	58,87
0,50	23,48	18,11	15,54	27,26	17,71	30,45	21,64	66,66
0,67	27,79	21,34	17,40	32,06	20,01	35,82	26,48	71,96
0,83	31,69	24,40	18,81	36,59	21,99	40,97	30,90	75,83
1,00	34,91	27,31	20,28	40,16	24,64	45,75	34,95	78,73
1,17	38,26	30,05	22,46	43,36	27,72	50,25	38,28	80,07
1,33	42,34	32,71	24,55	46,18	31,33	54,41	41,50	82,38
1,50	45,39	35,33	26,89	48,46	35,48	58,28	45,59	83,54
1,67	47,73	37,87	29,47	50,56	38,75	61,91	50,25	84,36
1,83	48,85	40,37	31,51	52,47	42,63	65,38	52,52	85,13
2,00	50,22	42,98	32,69	54,29	46,88	68,67	54,76	86,77
2,17	51,11	45,64	33,87	55,92	52,39	71,78	59,29	88,85
2,33	51,96	48,15	35,63	57,47	58,67	74,78	62,85	90,62

Tabela D4.4 (continuação) – Temperatura no interior da massa de pizza para t =5 minutos.

Tempo (min.)	Temperatura (°C)							
	T112	T122	T132	T212	T222	T232	T312	T322
2,50	52,72	51,57	37,31	58,93	65,37	77,61	65,89	91,75
2,67	53,41	52,32	38,78	60,35	71,91	80,24	68,27	92,68
2,83	54,10	54,17	39,66	61,83	77,46	82,74	70,29	93,43
3,00	54,73	55,61	41,40	63,45	82,45	85,07	72,04	94,24
3,17	55,33	56,19	42,47	65,04	86,45	87,25	73,66	94,86
3,33	55,90	56,93	43,71	66,63	90,75	89,23	75,12	95,33
3,50	56,48	57,72	44,52	68,44	92,62	92,03	76,69	95,90
3,67	57,04	58,51	45,61	70,50	94,51	93,36	78,24	96,37
3,83	57,58	59,35	47,06	72,40	96,03	94,96	79,99	96,95
4,00	58,12	60,22	48,21	74,25	97,14	95,89	81,54	97,53
4,17	58,64	60,94	50,05	76,01	97,86	96,98	82,95	97,99
4,33	59,19	61,76	51,84	77,76	98,44	98,09	85,85	98,49
4,50	59,68	62,63	53,12	79,52	99,17	98,69	87,96	98,86
4,67	60,19	63,71	54,58	81,20	99,24	98,87	89,72	99,18
4,83	60,69	65,25	56,40	82,73	99,48	99,51	91,52	99,54
5,00	61,06	66,86	57,93	86,94	99,71	99,84	92,45	99,89

Tabela D4.5 – Temperatura no interior da massa de pizza para t=10 minutos.

Tempo (min.)	Temperatura (°C)						
	T113	T123	T133	T213	T223	T233	T313
0,00	10,01	9,17	9,79	10,78	9,95	9,72	9,53
0,17	13,32	10,48	11,91	13,99	10,68	13,77	10,76
0,33	17,88	11,77	14,04	16,89	12,76	18,54	11,85
0,50	22,39	13,09	16,52	19,54	15,32	23,68	13,13
0,67	26,24	14,43	19,40	22,38	17,60	28,84	14,58
0,83	29,42	15,79	22,16	25,02	20,23	34,13	16,36
1,00	31,95	17,20	24,94	27,41	24,08	39,49	18,42
1,17	34,01	18,67	28,10	29,42	28,00	45,02	20,72
1,33	35,66	20,28	31,23	31,73	31,88	50,10	23,31
1,50	36,93	21,97	34,29	33,54	35,57	53,23	26,67
1,67	37,79	23,75	37,14	35,28	38,92	55,70	31,33
1,83	38,40	25,63	40,38	36,97	42,11	59,08	34,74
2,00	38,67	27,55	43,21	38,68	45,26	61,78	37,75
2,17	39,23	29,47	45,67	40,41	48,30	63,81	40,97
2,33	39,91	31,36	48,30	42,11	51,25	66,03	43,17
2,50	40,61	33,20	50,78	43,85	54,08	68,16	46,48
2,67	41,35	34,94	52,89	45,58	56,72	70,11	49,85
2,83	42,19	36,57	55,01	47,34	59,15	71,95	53,14

Tabela D4.5 (continuação) – Temperatura no interior da massa de pizza para t=10 minutos.

Tempo (min.)	Temperatura (°C)						
	T113	T123	T133	T213	T223	T233	T313
3,00	43,04	38,11	56,78	49,05	61,49	73,66	56,61
3,17	43,91	39,62	58,37	50,81	63,82	75,31	60,04
3,33	44,76	41,00	60,19	52,52	65,98	76,88	63,21
3,50	45,57	42,34	61,81	54,19	68,03	78,32	66,12
3,67	46,50	43,59	63,47	55,56	70,03	79,74	68,99
3,83	47,54	44,75	64,50	57,50	71,91	81,13	71,85
4,00	48,61	45,92	65,89	59,15	73,68	82,52	74,40
4,17	49,71	46,97	67,17	60,74	75,30	83,85	76,67
4,33	50,73	48,00	67,95	62,25	76,87	85,15	78,78
4,50	51,72	48,94	69,05	63,69	78,38	86,40	80,66
4,67	52,62	49,86	69,78	65,08	79,81	87,61	82,55
4,83	53,50	50,73	70,70	66,44	81,16	88,76	84,33
5,00	54,31	51,56	71,55	67,48	82,43	89,91	85,84
5,17	55,12	52,38	72,27	68,29	83,64	90,97	86,92
5,33	55,91	53,16	72,69	69,88	84,80	91,92	88,39
5,50	56,66	53,92	73,80	71,28	85,89	92,80	89,94
5,67	57,42	54,71	74,89	73,03	86,97	93,56	91,19
5,83	58,13	55,43	75,49	75,13	88,03	94,36	92,32
6,00	58,82	56,15	76,33	77,09	89,04	95,14	93,45
6,17	59,47	56,86	77,42	79,01	90,02	96,00	94,43
6,33	60,07	57,58	78,61	81,01	90,92	96,79	95,26
6,50	60,70	58,38	79,27	82,65	91,94	97,71	96,00
6,67	61,29	59,76	79,53	83,95	92,84	98,61	96,68
6,83	61,85	60,63	79,79	85,30	93,64	99,38	97,27
7,00	62,33	61,36	80,30	86,64	94,50	99,85	97,80
7,17	62,81	62,06	80,15	87,97	95,23	100,21	98,20
7,33	63,25	62,77	80,51	89,28	95,92	100,45	98,64
7,50	63,64	63,50	80,46	90,53	96,57	100,60	99,13
7,67	64,05	64,24	80,98	91,74	97,15	100,74	99,52
7,83	64,43	64,83	81,54	92,44	97,72	100,82	99,80
8,00	64,83	65,38	81,76	92,93	98,04	100,83	99,99
8,17	65,21	65,91	82,22	93,82	98,46	100,90	100,05
8,33	65,54	66,39	82,63	94,68	98,59	100,90	100,12
8,50	65,92	66,91	83,20	95,67	99,00	100,95	100,18
8,67	66,33	67,42	83,66	96,02	99,38	100,96	100,22
8,83	66,74	67,94	84,35	96,69	99,71	100,97	100,27
9,00	67,09	68,44	84,80	97,23	99,90	101,00	100,30
9,17	67,46	68,94	85,31	97,76	99,91	100,97	100,36
9,33	67,77	69,45	85,70	98,04	99,70	100,99	100,40
9,50	68,11	69,94	86,10	98,53	99,70	100,99	100,44
9,67	68,37	70,47	86,67	98,99	99,76	101,01	100,26
9,83	68,65	71,00	86,87	99,47	99,83	101,01	100,72
10,00	68,89	71,49	87,57	99,95	99,63	101,02	100,89

APÊNDICE – E

QUANTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

E1.1 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DA CAPACITÂNCIA GLOBAL

Análise estatística para as hipóteses avaliadas na validação do método da capacitância global, apresentadas no Capítulo 4, subitem 4.2.1.

Tabela E.1 – Análise de variância para as temperaturas das curvas nos tempos $t=5\text{min.}$, $t=10\text{min.}$, $t=15\text{min.}$, $t=30\text{min.}$, $t=45\text{min.}$ e $t=60\text{min.}$

<i>t = 5 min.</i>					
<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeito principal	4	47,002	11,750	17,85	0,175
Interação de 2ª ordem	2	3,617	1,808	2,75	0,392
Erro	1	0,658	0,658	0,6582	
Total	7	51,227			

<i>t = 10 min.</i>					
<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeito principal	4	15,237	3,810	19,88	0,166
Interação de 2ª ordem	2	1,513	0,757	3,95	0,335
Erro	1	0,192	0,192		
Total	7	16,942			

<i>t = 15 min.</i>					
<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeito principal	4	6,621	1,655	23,33	0,154
Interação de 2ª ordem	2	1,499	0,749	10,56	0,213
Erro	1	0,071	0,071		
Total	7	8,190			

<i>t = 30 min.</i>					
<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeito principal	4	2,164	0,541	16,77	0,161
Interação de 2ª ordem	2	2,681	1,340	41,55	0,109
Erro	1	0,032	0,032		
Total	7	4,877			

<i>t = 45 min.</i>					
<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeito principal	4	1,840	0,460	12,50	0,209
Interação de 2ª ordem	2	3,667	1,833	49,81	0,100
Erro	1	0,037	0,037		
Total	7	5,542			

<i>t = 60 min.</i>					
<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeito principal	4	1,247	0,312	2,30	0,455
Interação de 2ª ordem	2	1,012	0,506	3,73	0,344
Erro	1	0,136	0,136		
Total	7	2,394			

Tabela E.2 – Análise de variância para os coeficientes das curvas

C1					
<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeito principal	4	1,74E-23	4,35E-24	23,8	0,152
Interação de 2ª ordem	2	2,62E-24	1,31E-24	7,16	0,272
Erro	1	1,83E-25	1,83E-25		
Total	7	2,02E-23			

C2					
<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeito principal	4	6,40E-17	1,60E-17	24,2	0,151
Interação de 2ª ordem	2	9,19E-18	4,60E-18	6,95	0,276
Erro	1	6,61E-19	6,61E-19		
Total	7	7,38E-17			

C3					
<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeito principal	4	3,07E-11	7,67E-12	27,3	0,143
Interação de 2ª ordem	2	3,89E-12	1,95E-12	6,92	0,277
Erro	1	2,81E-13	2,81E-13		
Total	7	3,48E-11			

C4					
<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeito principal	4	2,7E-06	6,7E-07	32,11	0,132
Interação de 2ª ordem	2	3,0E-07	1,5E-07	7,07	0,257
Erro	1	2,0E-09	2,0E-08		
Total	7				

C5					
<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeito principal	4	0,0318	0,0079	25,48	0,147
Interação de 2ª ordem	2	0,0036	0,0018	5,80	0,282
Erro	1	0,0003	0,0003		
Total	7	0,0357			

Tabela E.3 – Análise de variância para as áreas abaixo das curvas.

<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeito principal	4	48.382,0	12.095,5	22,91	0,155
Interação de 2ª ordem	2	5.648,2	2.824,1	5,35	0,292
Erro	1	528,0	528,0		
Total	7	54.558,2			

APÊNDICE – F**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA PIZZA**

Apêndice F1 – Determinação da difusividade térmica da massa de pizza

Apêndice F2 – Determinação da condutividade térmica da pizza

APÊNDICE F1 – DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA MASSA DE PIZZA

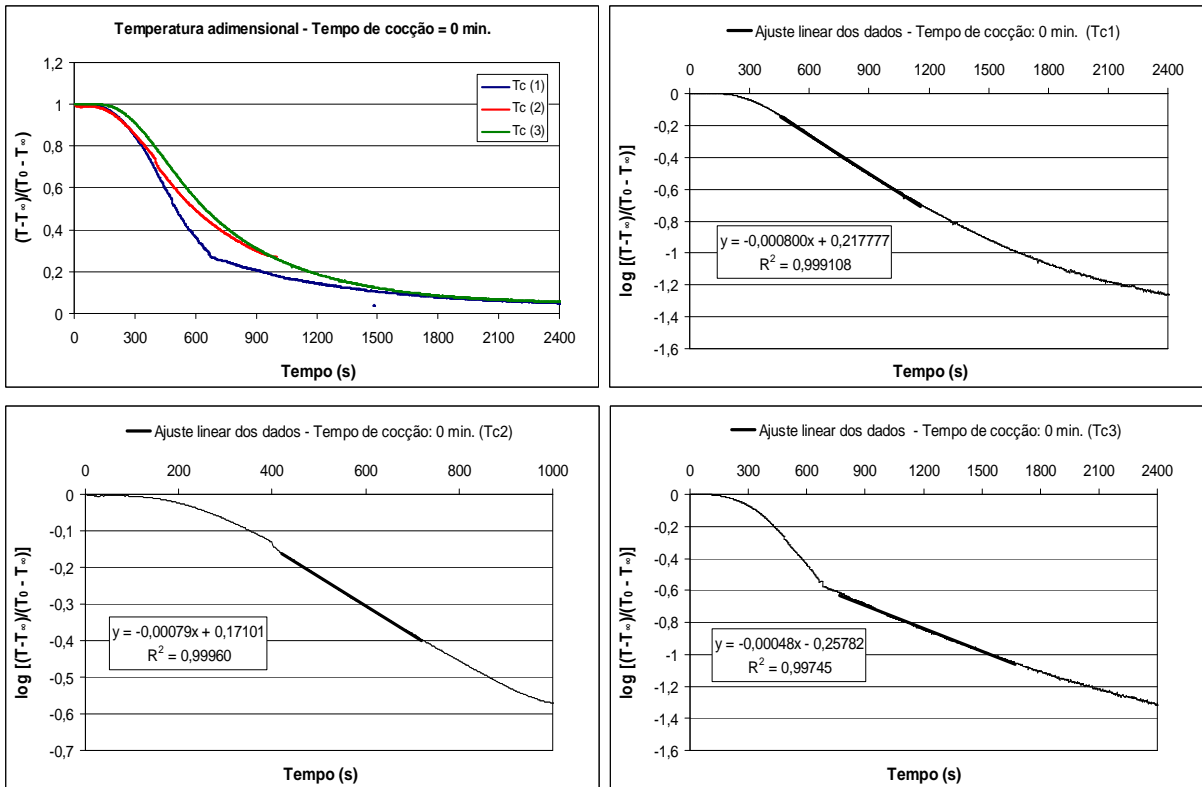


Figura F1.1 – Temperatura adimensional e logaritmo da temperatura adimensional em função do tempo de aquecimento, para a massa de pizza crua, em meio de aquecimento a 70°C.

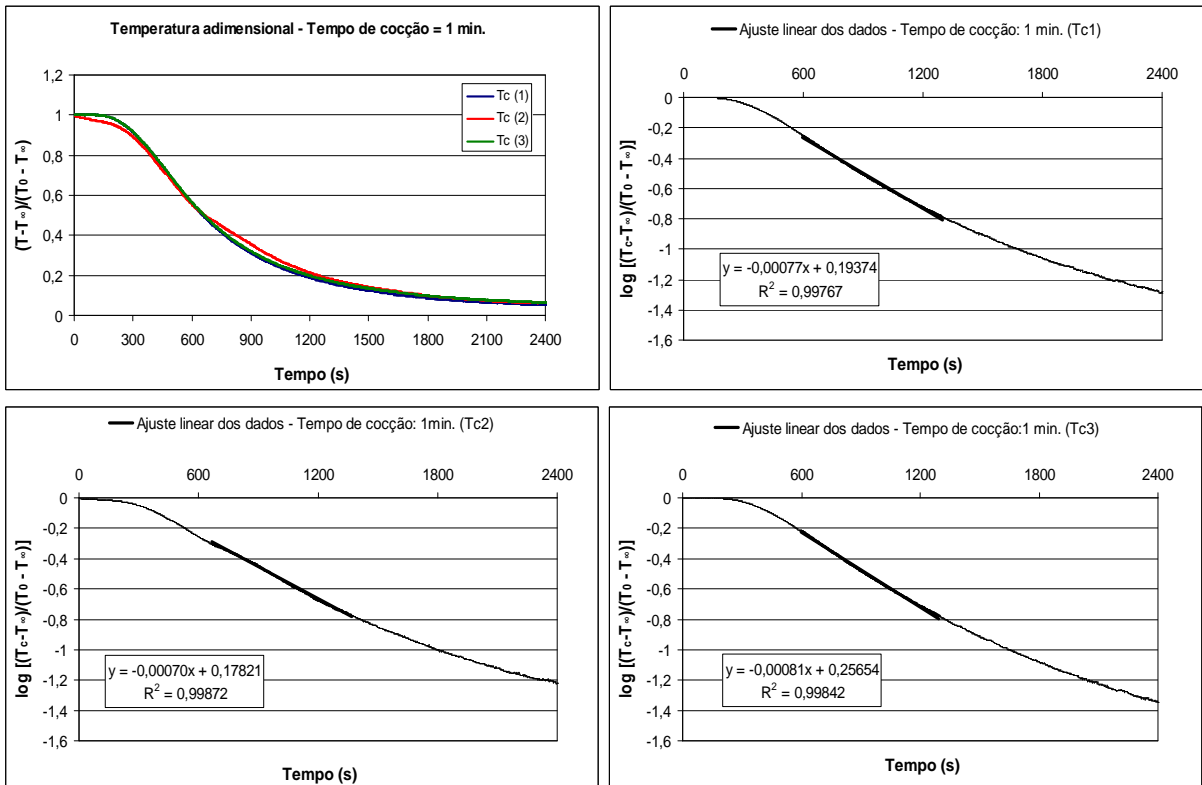


Figura F1.2 – Temperatura adimensional e logaritmo da temperatura adimensional em função do tempo de aquecimento, para a massa após 1 min. de cocção, em meio de aquecimento a 70°C.

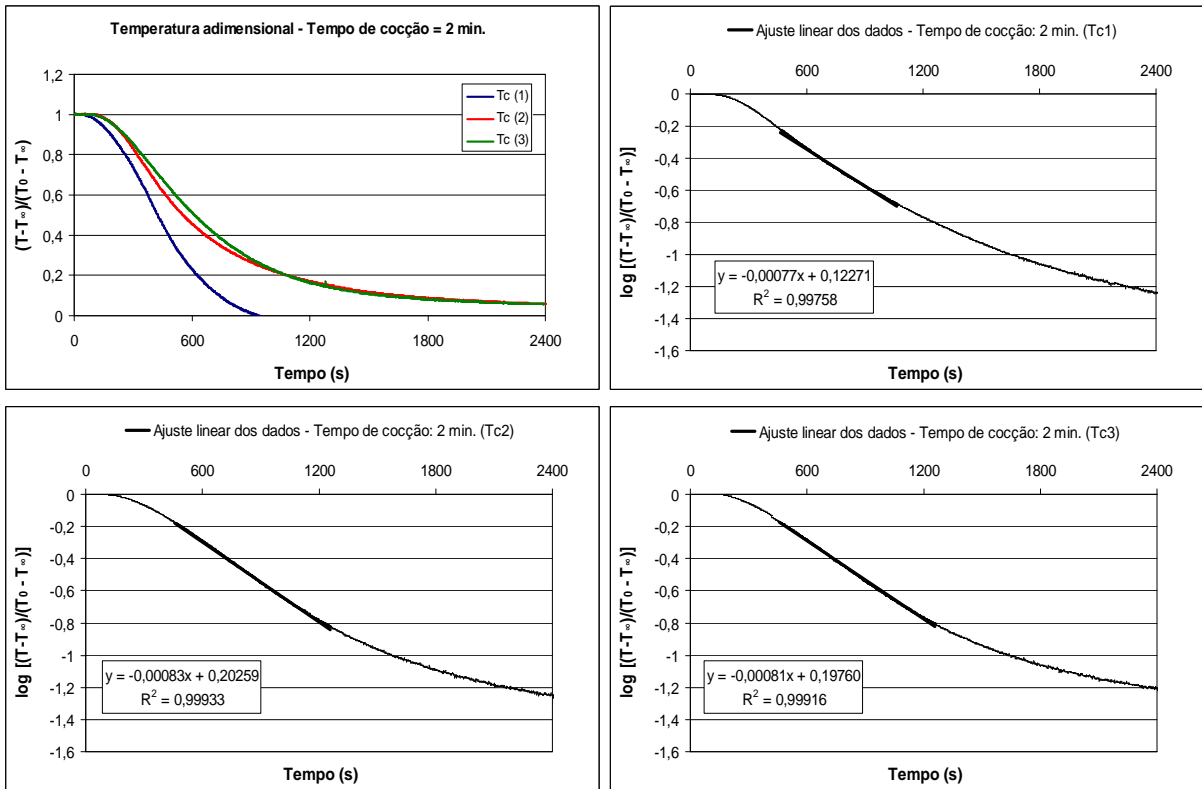


Figura F1.3 – Temperatura adimensional e logaritmo da temperatura adimensional em função do tempo de aquecimento, para a massa após 2 min. de cocção, em meio de aquecimento a 70°C.

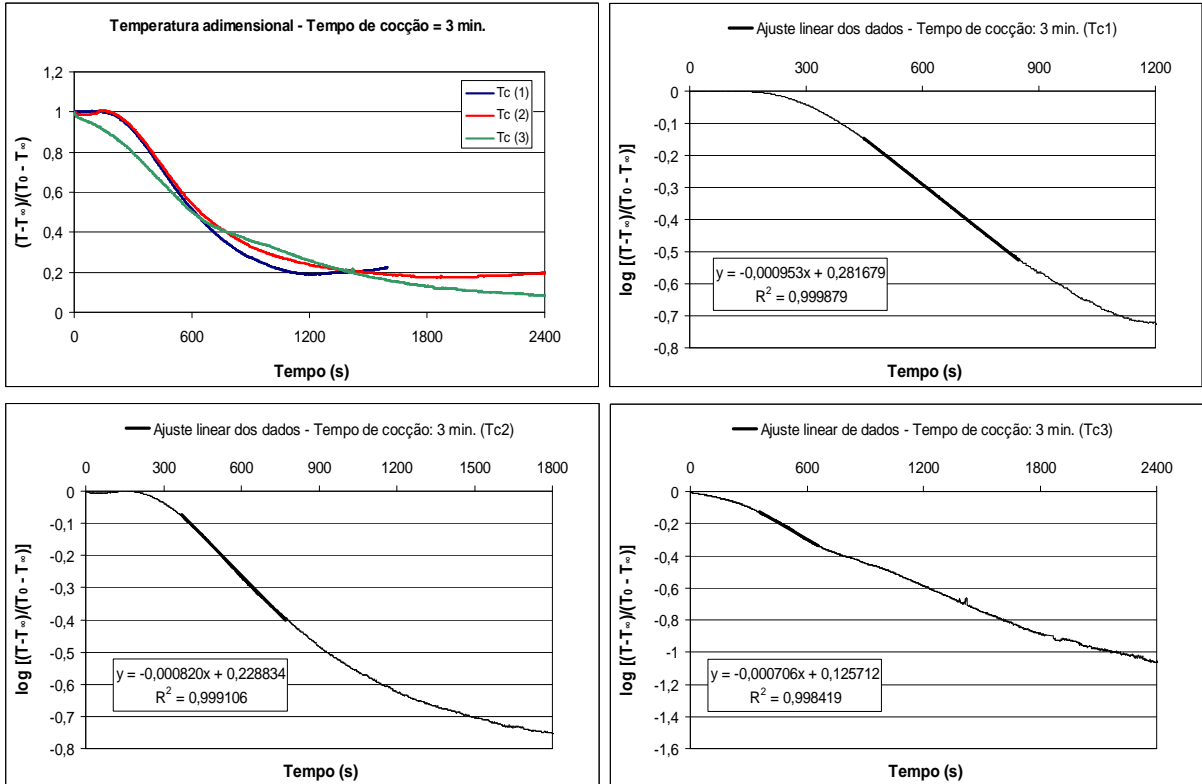


Figura F1.4 – Temperatura adimensional e logaritmo da temperatura adimensional em função do tempo de aquecimento, para a massa após 3 min. de cocção, em meio de aquecimento a 70°C.

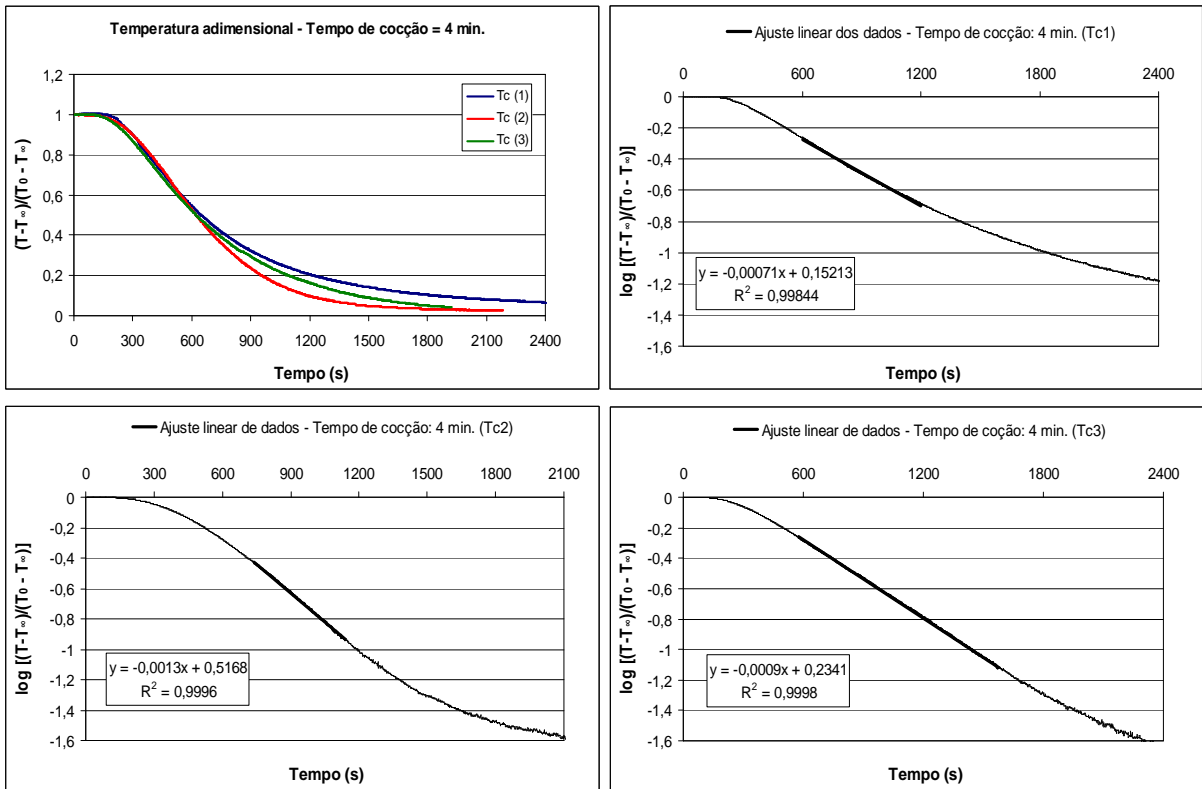


Figura F1.5 – Temperatura adimensional e logaritmo da temperatura adimensional em função do tempo de aquecimento, para a massa após 4 min. de cocção, em meio de aquecimento a 70°C.

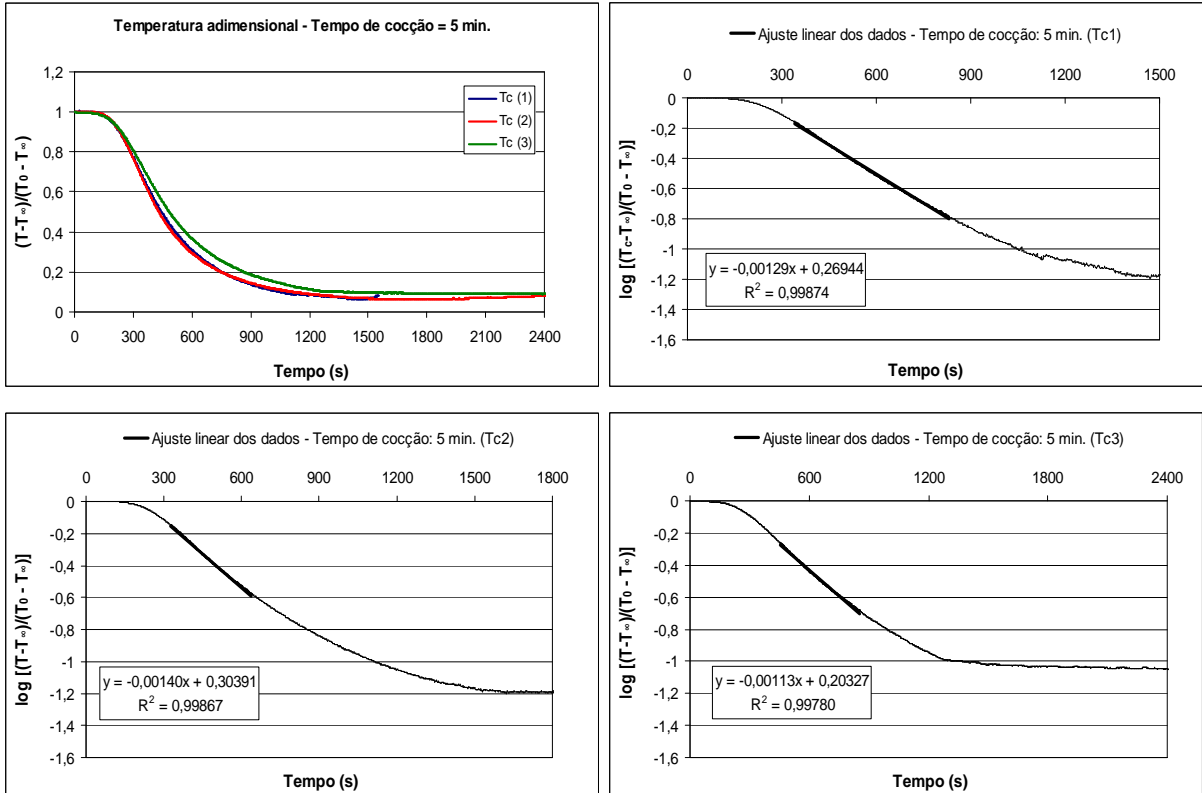


Figura F1.6 – Temperatura adimensional e logaritmo da temperatura adimensional em função do tempo de aquecimento, para a massa após 5 min. de cocção, em meio de aquecimento a 70°C.

APÊNDICE F2 – DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA PIZZA

F2.1 CALIBRAÇÃO DA SONDA LINEAR DE AQUECIMENTO

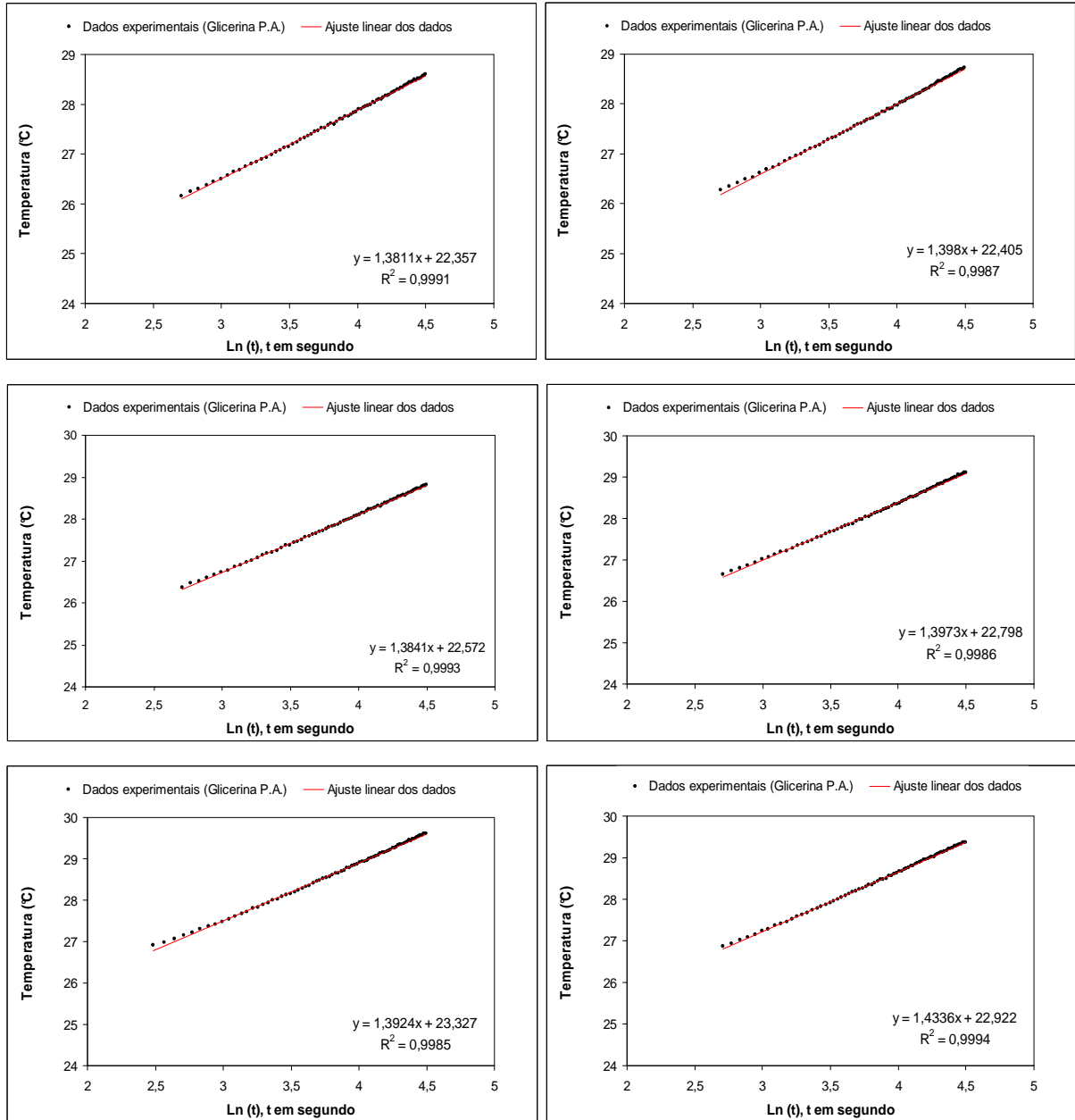


Figura F2.1 – Gráfico da temperatura em função de Ln (t) para a sonda linear de aquecimento durante a calibração com glicerina P.A..

F2.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA MASSA DE PIZZA

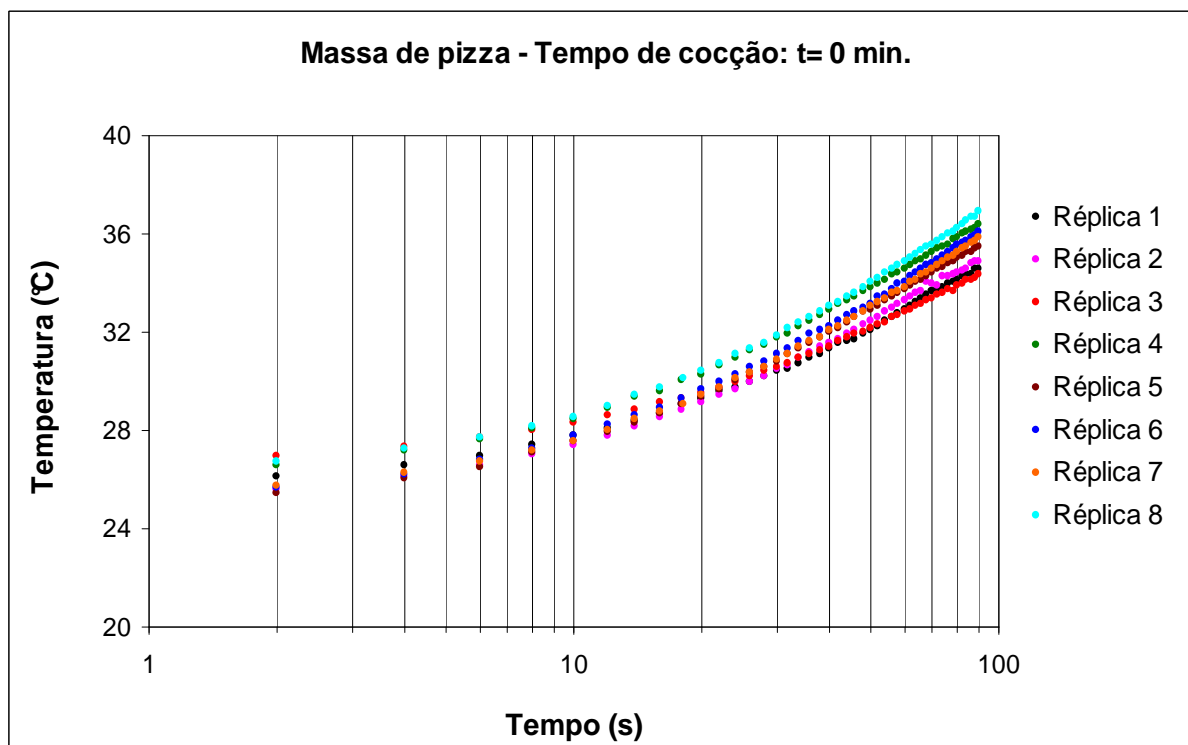


Figura F2.2 – Gráfico da temperatura em função do tempo, utilizando a sonda linear de aquecimento, para a massa de pizza crua.

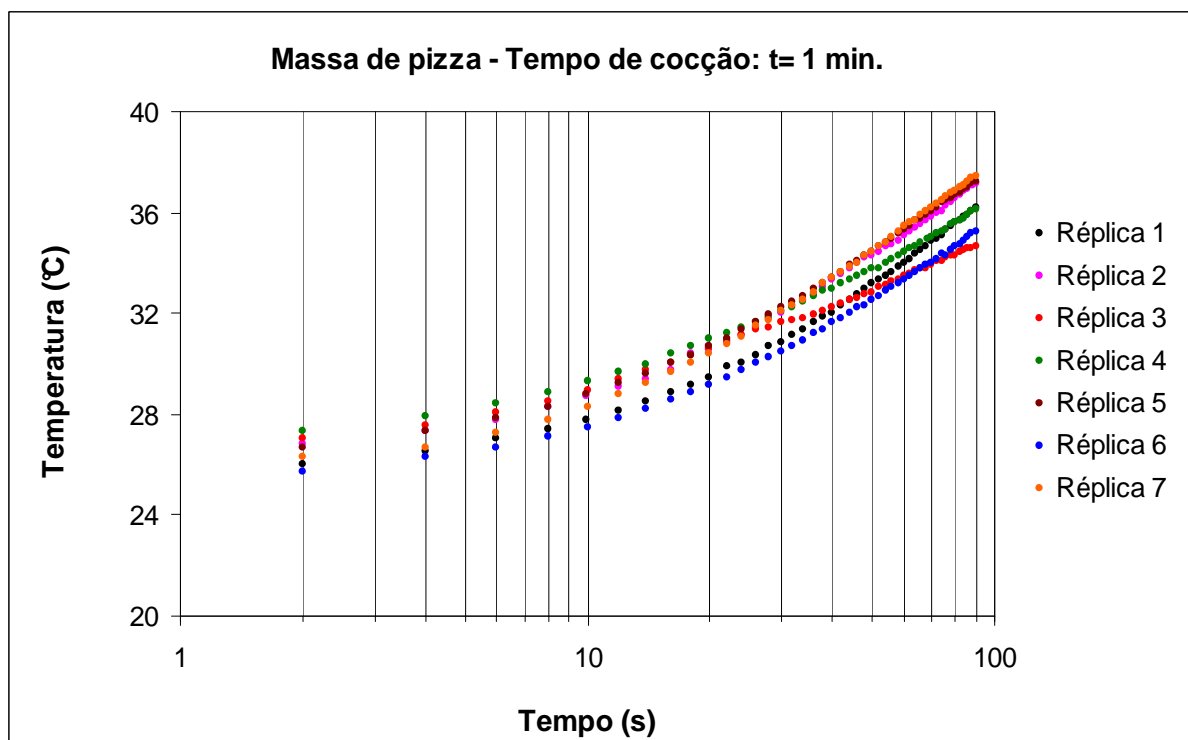


Figura F2.3 – Gráfico da temperatura em função do tempo, utilizando a sonda linear de aquecimento, para a massa de pizza após 1 min. de cocção.

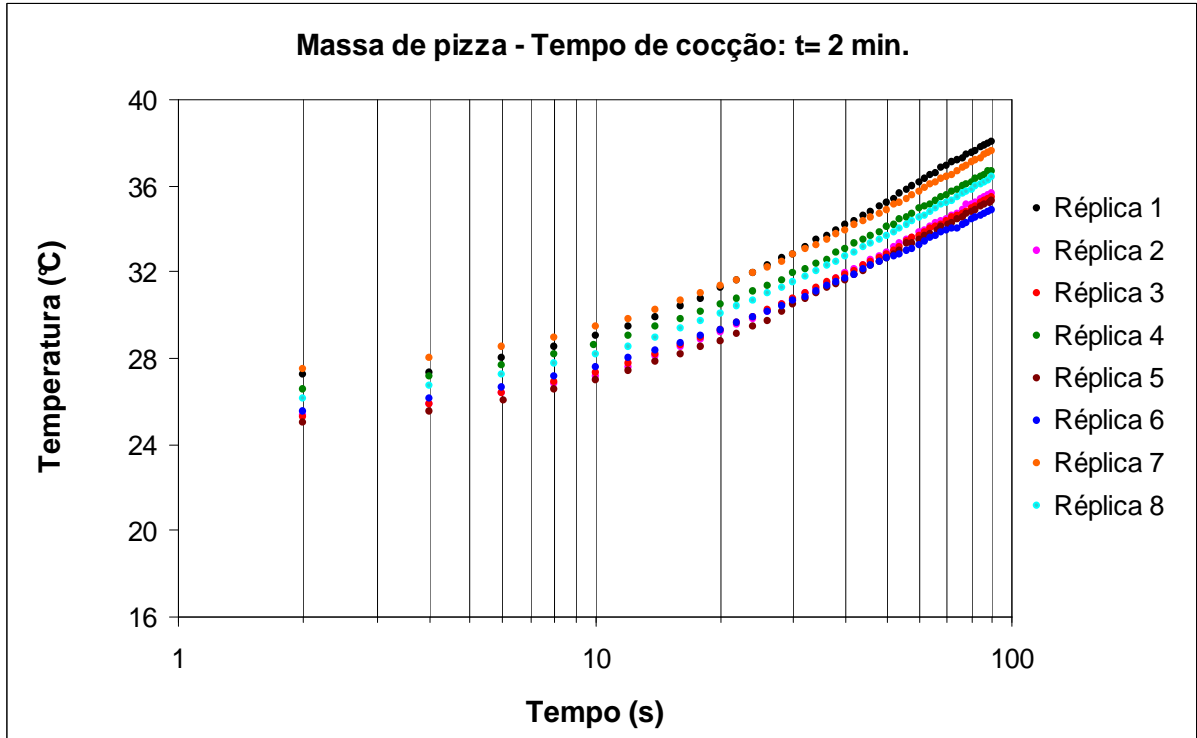


Figura F2.4 – Gráfico da temperatura em função do tempo, utilizando a sonda linear de aquecimento, para a massa de pizza após 2 min. de cocção.

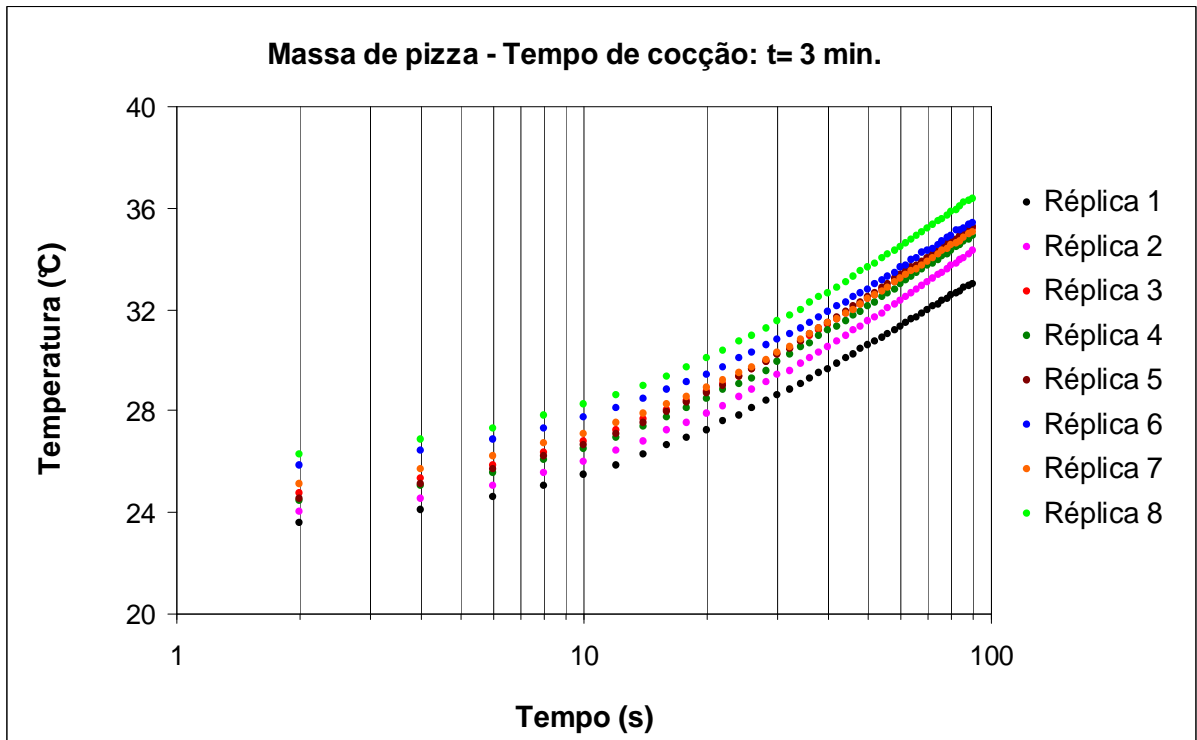


Figura F2.5 – Gráfico da temperatura em função do tempo, utilizando a sonda linear de aquecimento, para a massa de pizza após 3 min. de cocção.

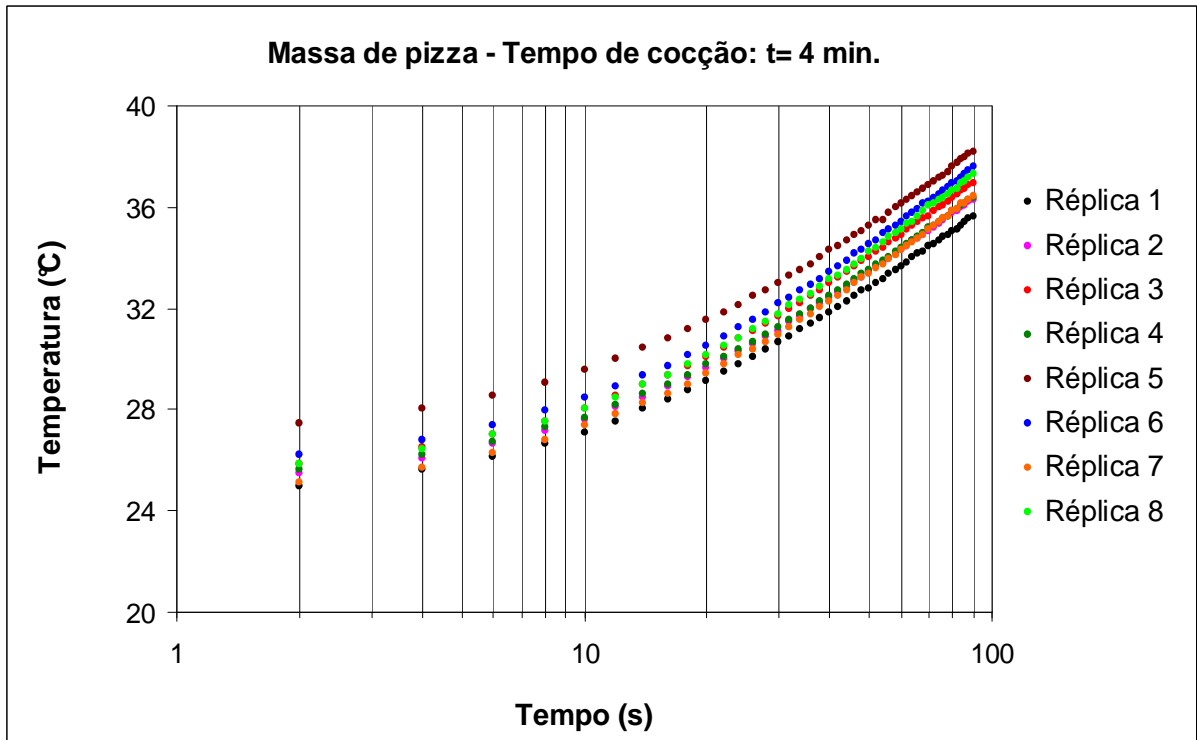


Figura F2.6 – Gráfico da temperatura em função do tempo, utilizando a sonda linear de aquecimento, para a massa de pizza após 4 min. de cocção.

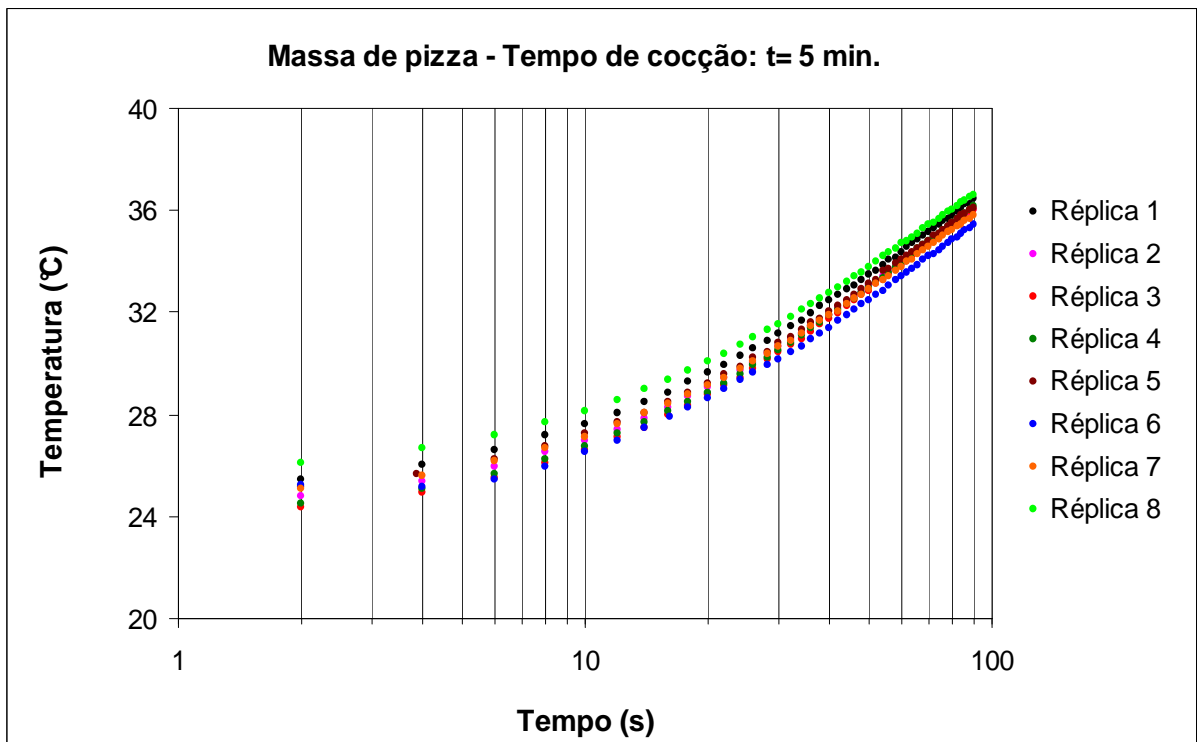


Figura F2.7 – Gráfico da temperatura em função do tempo, utilizando a sonda linear de aquecimento, para a massa de pizza após 5 min. de cocção.

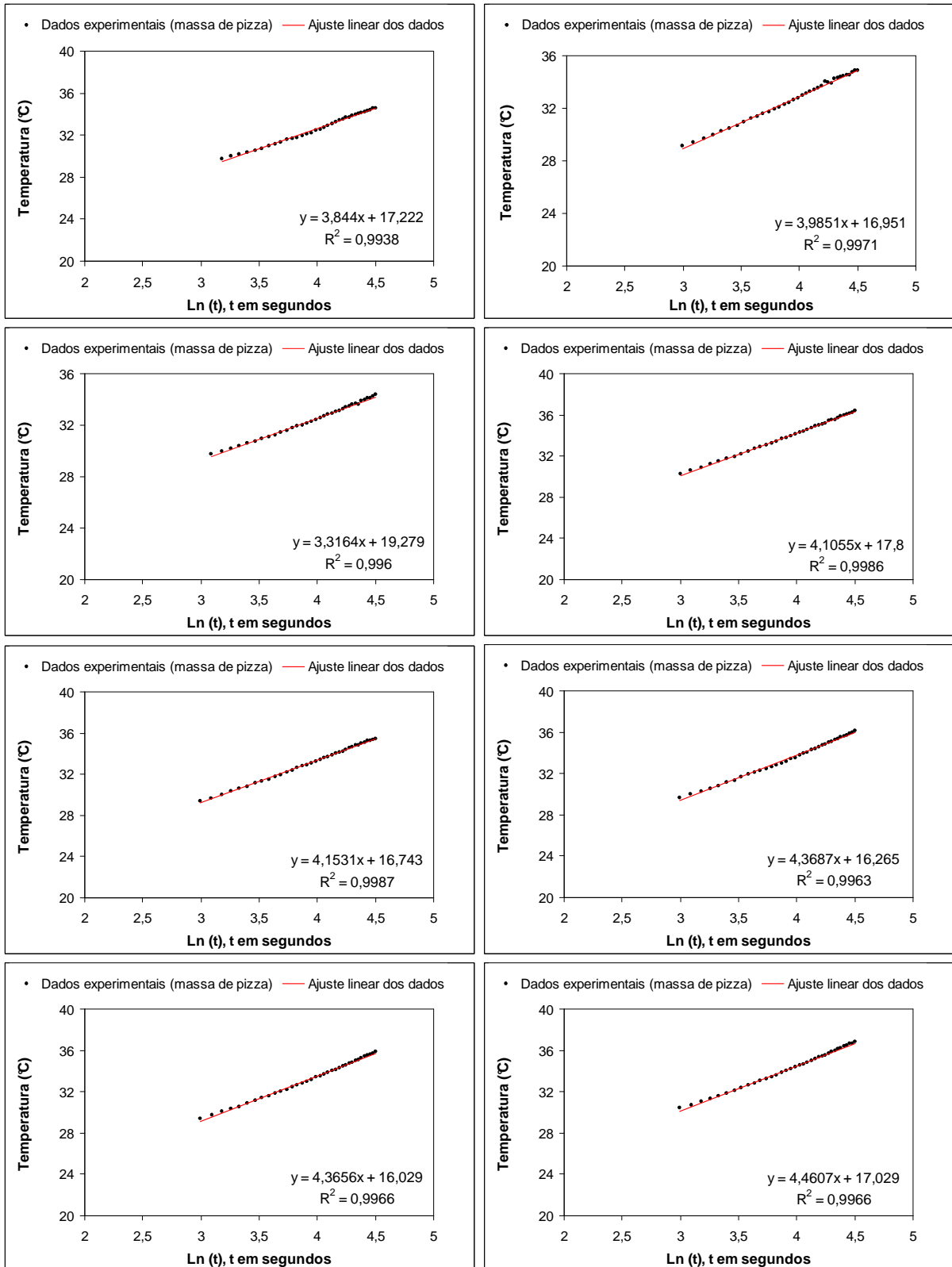


Figura F2.8 – Gráficos da temperatura em função de $\ln(t)$, utilizando a sonda linear de aquecimento, para as massas de pizza cruas.

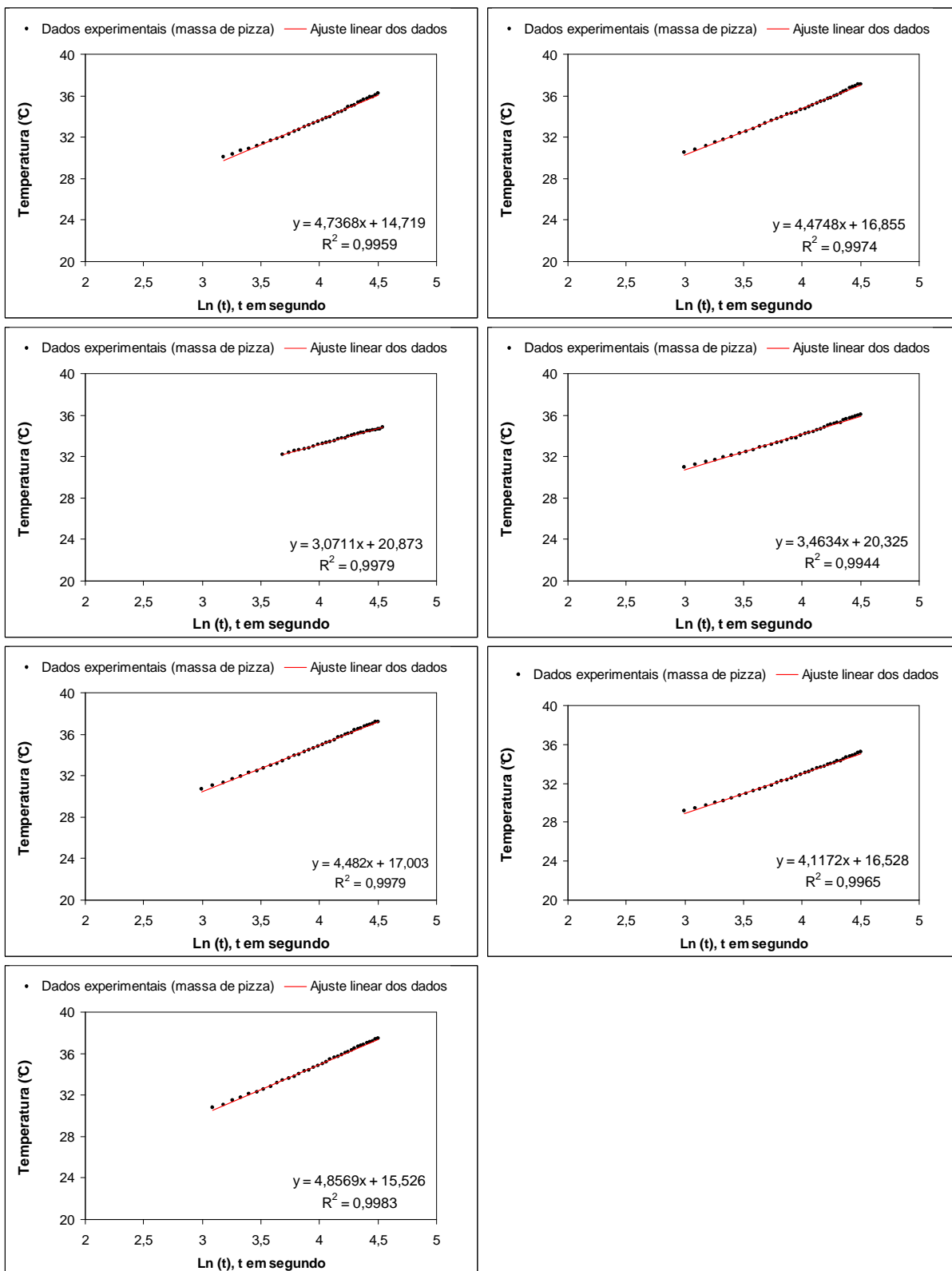


Figura F2.9 – Gráficos da temperatura em função de $\ln(t)$, utilizando a sonda linear de aquecimento, para as massas de pizza após 1 min. de cocção.

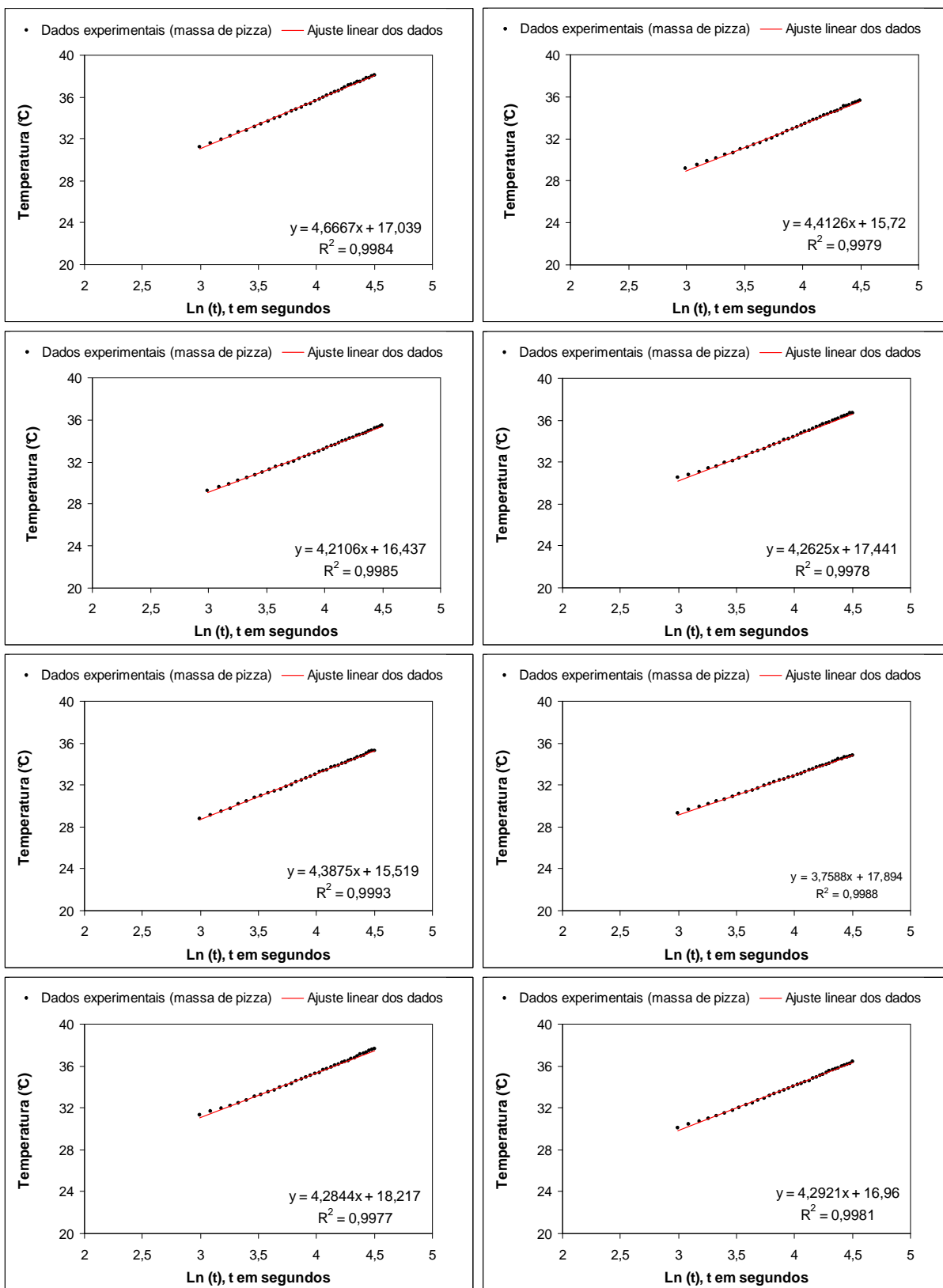


Figura F2.10 – Gráficos da temperatura em função de $\ln(t)$, utilizando a sonda linear de aquecimento, para as massas de pizza após 2 min. de cocção.

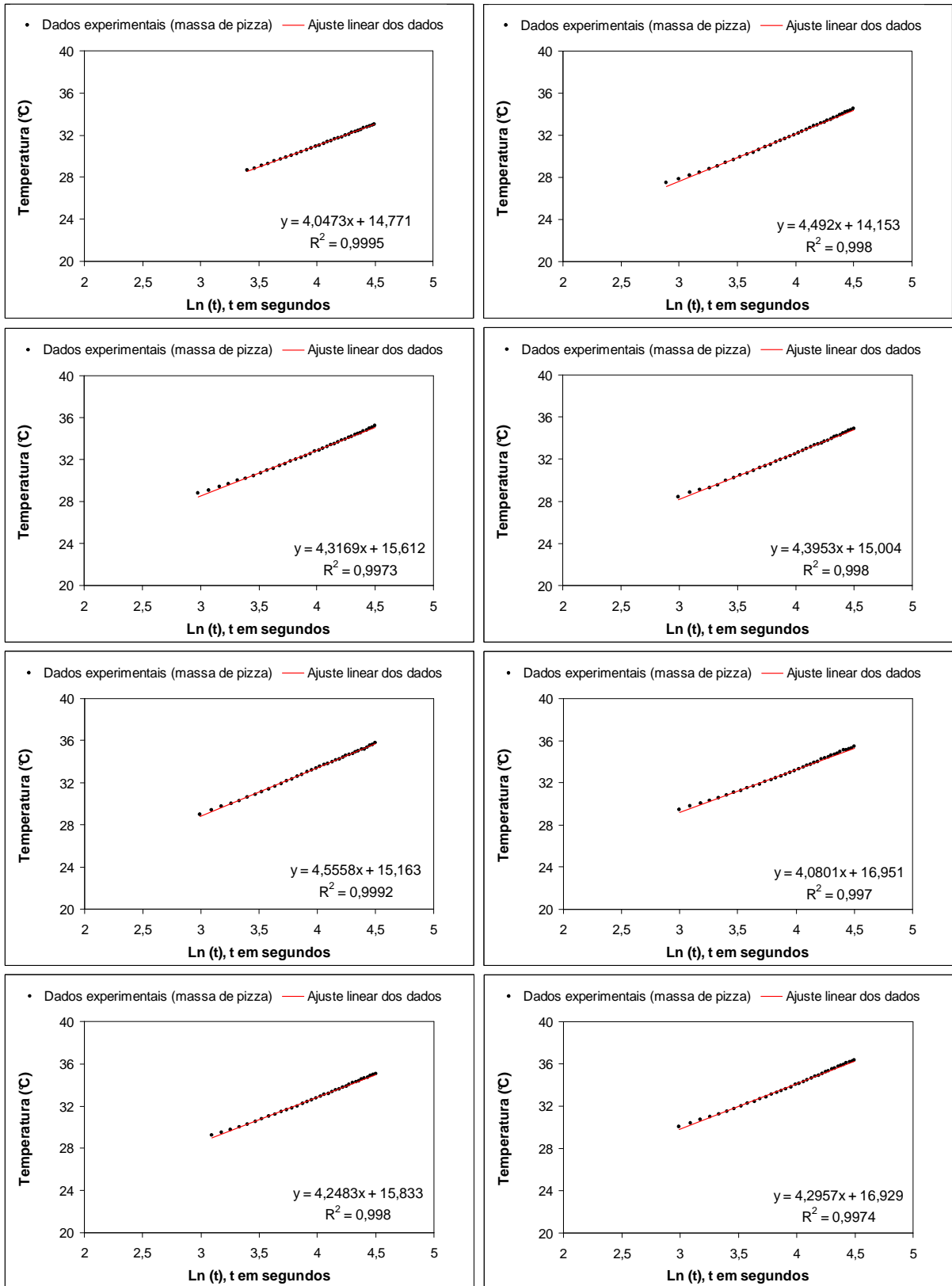


Figura F2.11 – Gráficos da temperatura em função de $\ln(t)$, utilizando a sonda linear de aquecimento, para as massas de pizza após 3 min. de cocção.

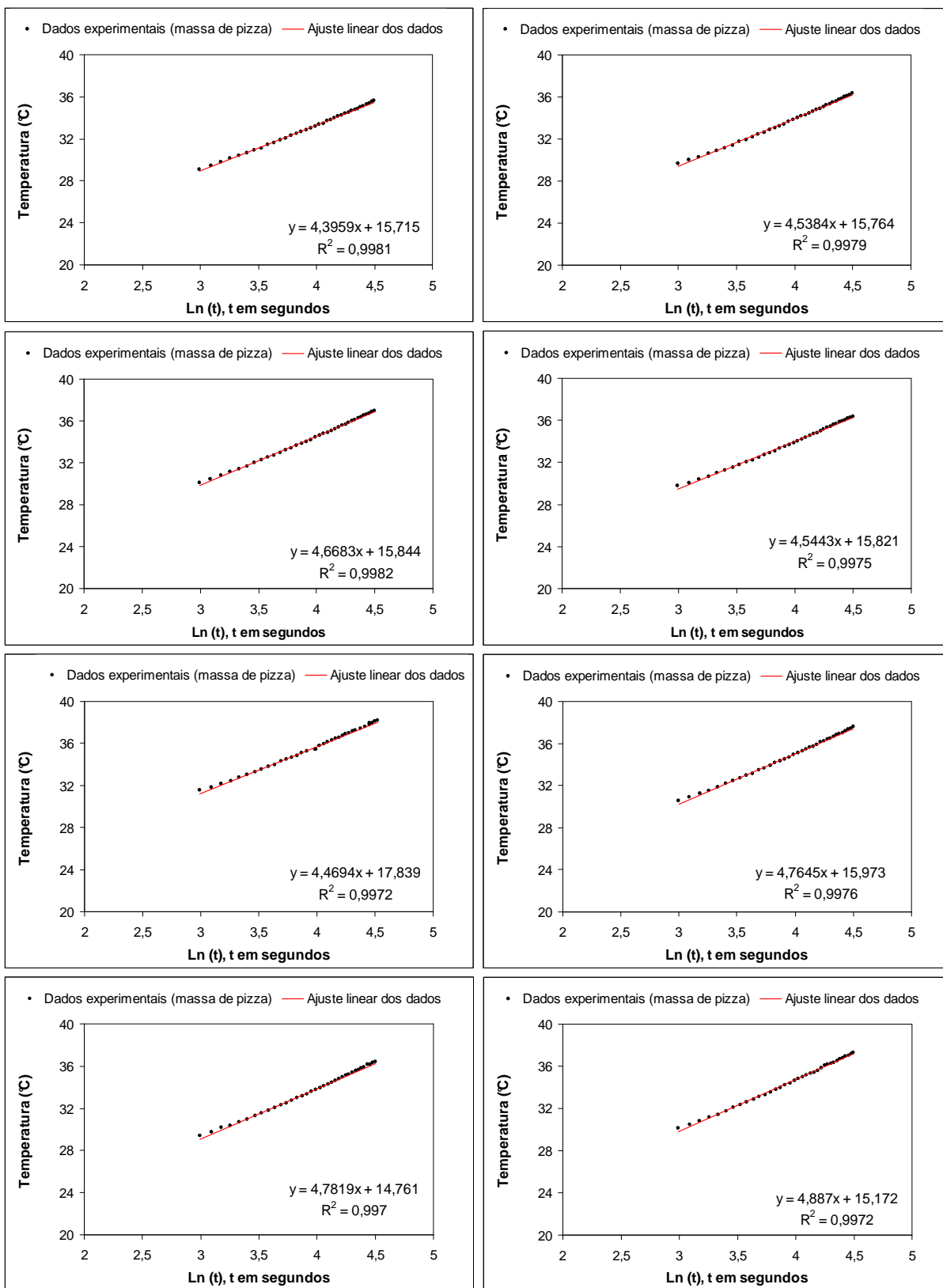


Figura F2.12– Gráficos da temperatura em função de $\ln(t)$, utilizando a sonda linear de aquecimento, para as massas de pizza após 4 min. de cocção.

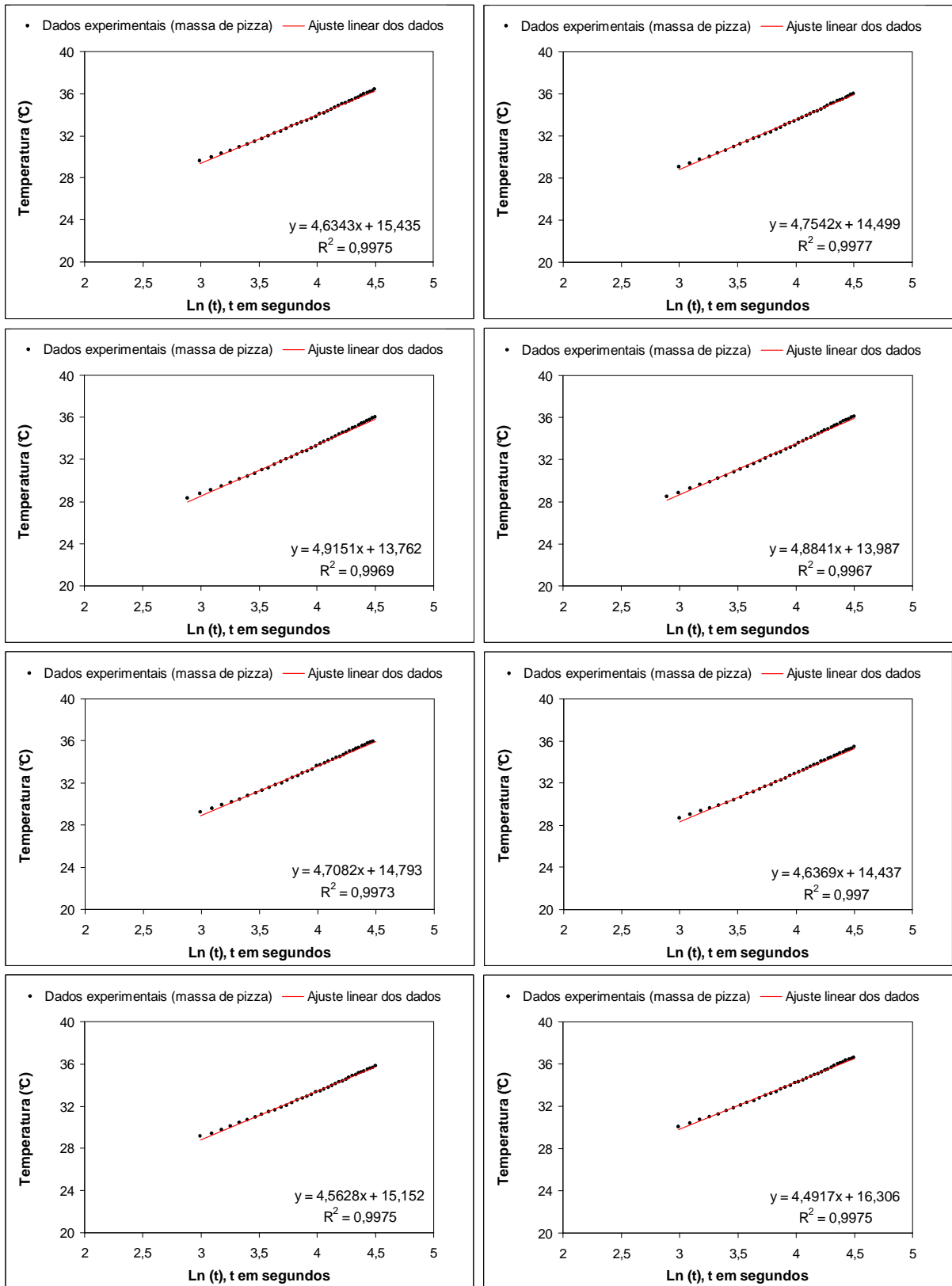


Figura F2.13 – Gráficos da temperatura em função de $\ln(t)$, utilizando a sonda linear de aquecimento, para as massas de pizza após 5 min. de cocção.

APÊNDICE – G

ANÁLISE DE INCERTEZAS

Quando é realizada uma medição, dois valores importam: um é o valor numérico da variável medida e o outro é a incerteza associada a este valor numérico. Como qualquer resultado experimental traz consigo erros inerentes às medidas experimentais realizadas, sempre haverá diferença entre o valor real de uma grandeza física e o seu valor medido. O estabelecimento da incerteza de medição permite estimar a faixa de valores dentro da qual o valor verdadeiro, provavelmente, deva estar.

As incertezas podem ser estimadas, reduzidas e até controladas a partir de uma criteriosa análise de erros. De forma geral os erros podem ser classificados em:

- Erros grosseiros: são cometidos principalmente devido à imperícia, inabilidade e negligência por parte do operador ao efetuar uma medida.
- Erros sistemáticos: são resultados de fatores independentes do operador. São constantes em grandeza e sinal, nunca se compensam e podem ser eliminados calibrando-se o sistema de medição e aquisição de dados.
- Erros aleatórios: são erros devidos a variações ao acaso, de causas indeterminadas. Podem ser atenuadas, mas não completamente eliminadas.

A incerteza de medição é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos ao mensurando. É a estimativa que segue o resultado da medição, que caracteriza o intervalo de valores dentro do qual é possível assegurar que se encontra presente o valor real, com um determinado nível de confiança. O parâmetro associado ao resultado pode ser, por exemplo, um desvio padrão ou a metade de um intervalo correspondente a um nível de confiança estabelecido. Se a incerteza do resultado de uma medição é expressa como um desvio-padrão, denomina-se incerteza padrão.

Em relação aos métodos utilizados para estimar o seu valor numérico, têm-se dois tipos de incertezas: tipo A e tipo B. As incertezas do tipo A são incertezas padrão, cuja avaliação é feita a partir da análise estatística de uma série de observações. As incertezas do tipo B são aquelas associadas a uma grandeza não estimada a partir de observações repetidas, decorrendo principalmente da sensibilidade e da resolução do instrumento de medição utilizado, ou seja, de uma limitação instrumental. (CIENFUEGOS, 2005). A resolução do instrumento é igual à menor divisão da escala do instrumento.

O efeito de uma limitação instrumental pode ser avaliado a partir de um caso extremo, no qual o resultado é dado por uma única medida. Em geral, as medidas resultantes de leitura em escala direta (instrumentos analógicos) que não dependam da reação do observador são dominados pela resolução do instrumento; basta que se efetue de maneira cuidadosa apenas uma leitura para a estimativa do valor da grandeza. O limite de erro para a leitura, neste caso, é igual à metade da resolução do instrumento. No caso de instrumentos digitais, que permitam a leitura direta do valor da grandeza, não há erros em relação à leitura, mas podem ocorrer flutuações no último algarismo mostrado (X). Em geral, nesses casos, adota-se como limite de erro de flutuação (L_f), com nível de confiança de 100%, a média da variação do último algarismo lido: (CIENFUEGOS, 2005)

$$L_f = (X_{\min} + X_{\max})/2 \quad (\text{G.1})$$

e como incerteza devida a flutuação associada a um intervalo de confiança de 95%:

$$E = L_f/2 \quad (\text{G.2})$$

Ainda, mesmo nos casos em que não há flutuações no último algarismo do mostrador, o fabricante do instrumento fornece o erro instrumental (ou erro de calibração) sendo o próprio limite de erro instrumental (L_i), em geral com nível de confiança de 95%, como:

$$L_i = a\% (\text{leitura}) + b \text{ dígito (último algarismo)} \quad (\text{G.3})$$

Assim, a incerteza padrão obtida com um instrumento digital de leitura direta, associado a um intervalo de confiança da ordem de 95%, poderá ser expressa por:

$$\delta = \sqrt{(L_f/2)^2 + (L_i)^2} \quad (\text{G.4})$$

No caso em que o valor do mensurado é obtido da combinação do valor de valores de outras grandezas, diz-se que a incerteza do valor mensurado é uma incerteza padrão combinada.

As estimativas das incertezas baseiam-se na hipótese ou constatação de que, quando o número de medidas cresce indefinidamente, a distribuição de frequência das medidas tende a distribuição normal ou Gaussiana.

Utilizando o procedimento descrito em Holman (1994), podem-se analisar as incertezas das medidas experimentais efetuadas neste trabalho.

O método clássico baseia-se na propagação das incertezas das grandezas. Essas grandezas se relacionam através de uma expressão matemática qualquer, representando o valor mensurado:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{G.5})$$

onde y representa o valor do mensurando, uma função de n grandezas de entrada independentes, x_1, x_2, \dots, x_n , com incertezas padrão $\delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \dots, \delta_{x_n}$ conhecidos.

As incertezas padrão dos valores mensurados podem ser estimadas usando a lei de propagação de incertezas, que se baseia na expansão da expressão em termos de uma série de Taylor que não será tratada neste texto.

Após expansão em série de Taylor, eliminação dos termos de ordem mais alta e redução dos termos semelhantes, chega-se a expressão geral para o caso no qual a grandeza y depende de n outras grandezas e as N medidas de cada uma das grandezas se distribuem em torno do ponto médio $\bar{X} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$:

$$\delta_y = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \delta_{x_k} \right)^2} \Rightarrow \delta_y = \frac{\delta_y}{\sqrt{N}} \quad (\text{G.6})$$

G.1 Incertezas experimentais do sistema de aquisição:

O sistema de aquisição, juntamente com a caixa isotérmica foi calibrado previamente utilizando-se um forno de calibração de termopares, resultando em uma incerteza padrão de 0,2°C para diferenças de temperaturas e 0,8°C para temperaturas absolutas. O sistema não apresentou erros sistemáticos.

G.2 Incertezas experimentais na determinação das áreas:

As áreas determinadas foram as das superfícies do forno e da superfície do bloco de alumínio, dadas pelas respectivas equações:

$$A_s = L_s H_s \quad (\text{G.7})$$

$$A_{\text{bloco}} = \pi R_{\text{bloco}}^2 \quad (\text{G.8})$$

onde L_s e H_s são, respectivamente, comprimento e altura da superfície e R_{bloco} é o raio do bloco de alumínio.

A incerteza experimental combinada para as áreas serão calculadas pelas Equações (G.9) e (G.10):

$$\delta A_{\text{sup}} = \sqrt{\left(\frac{\partial A_s}{\partial L_s} \delta L_s\right)^2 + \left(\frac{\partial A_s}{\partial H_s} \delta H_s\right)^2} \quad (\text{G.9})$$

$$\delta A_{\text{bloco}} = \sqrt{\left(\frac{\partial A_{\text{bloco}}}{\partial R_{\text{bloco}}} \delta R_{\text{bloco}}\right)^2} \quad (\text{G.10})$$

onde as incertezas do comprimento (δL_s) e da altura das superfícies (δH_s) e do raio do bloco (δR_{bloco}) serão assumidas como metade da menor divisão de escala, ou seja, 0,5mm.

Assim, para a medida das áreas, a incerteza experimental combinada associada a esta medida será:

$$\delta A_{\text{sup}} = \sqrt{(H_s \delta L_s)^2 + (L_s \delta H_s)^2} \quad (\text{G.11})$$

$$\delta A_{\text{bloco}} = \sqrt{(2\pi R_{\text{bloco}} \delta R_{\text{bloco}})^2} \quad (\text{G.12})$$

G.3 Incertezas experimentais na determinação das potências fornecidas:

A potência fornecida por uma resistência elétrica cilíndrica é dada pela Equação (G.13):

$$P_{\text{cil.reta}} = Ui \quad (\text{G.13})$$

onde U é a tensão e i é a corrente.

No caso do forno, a potência total fornecida foi calculada pela soma das potências fornecidas pelas resistências de todas as superfícies e é dada pela seguinte expressão:

$$P_{\text{total forno}} = \sum_{n=1}^5 P_i \quad (\text{G.14})$$

onde n corresponde às diferentes superfícies do forno.

Para a sonda, a potência fornecida pelo fio aquecedor foi calculada por:

$$P_{\text{fioaquecedor}} = Ui \quad (\text{G.15})$$

A incerteza experimental combinada para a potência fornecida por uma resistência será dada pela Equação (G.16):

$$\delta P_{\text{cil.reta}} = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial U} \delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial i} \delta i\right)^2} \quad (\text{G.16})$$

onde as incertezas da tensão (δU) e da corrente (δi) são assumidas como metade da menor divisão de escala dos mostradores.

Assim, incerteza experimental combinada total da potência fornecida para o forno será:

$$\delta P_{\text{total forno}} = \sqrt{\sum_{k=1}^5 \left[(i_k \delta U)^2 + (U_k \delta i)^2 \right]} \quad (\text{G.17})$$

onde a incerteza da tensão é $\delta U=0,5V$ e da corrente, $\delta i=0,005A$. (Fonte de alimentação utilizada: Heinzinger PTN 125-10).

A incerteza experimental combinada para a potência fornecida pela sonda linear de aquecimento será:

$$\delta P_{\text{fioaquecedor}} = \sqrt{(i\delta U)^2 + (U\delta i)^2} \quad (\text{G.18})$$

onde a incerteza da tensão é $\delta U=0,05V$ e da corrente, $\delta i=0,005A$. (Fonte de alimentação utilizada: SME Instrumentos 30V/5A).

G.4 Incertezas experimentais na determinação da difusividade térmica da massa de pizza:

A difusividade térmica da massa de pizza foi determinada pela seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{2,303}{\left(\frac{5,783}{R_{\text{cil}}^2}\right) f_h}; \text{ onde } f_h = -1/m \quad (\text{G.19})$$

onde R_{cil} é o raio do cilindro contendo a amostra, f_h é a taxa de aquecimento determinada experimentalmente e m é a inclinação da parte linear da curva obtida nos experimentos.

A incerteza experimental combinada associada a essas medidas será dada pela Equação (G.20):

$$\delta\alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial R_{cil}} \delta R_{cil}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial m} \delta m\right)^2} \quad (G.20)$$

$$\delta\alpha = \sqrt{\left(\frac{4,606}{5,783} m R_{cil} \delta R_{cil}\right)^2 + \left(\frac{2,303}{5,783} R_{cil}^2 \delta m\right)^2} \quad (G.21)$$

onde a incerteza do raio do cilindro, δR_{cil} , será assumida como metade da menor divisão de escala, ou seja, 0,5mm. A incerteza experimental da inclinação da reta será dada pelo desvio-padrão dos dados experimentais.

G.5 Incertezas experimentais na determinação da condutividade térmica da massa de pizza:

A condutividade térmica da massa de pizza foi determinada pela seguinte expressão:

$$k = \frac{Q_{sonda}}{4\pi S}; \text{ onde } S = \frac{(T - T_0)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} \quad (G.22)$$

onde Q_{sonda} é o calor fornecido pela sonda por unidade de comprimento e S é a inclinação da parte linear da curva obtida por $(T-T_0) \times \ln(t/t_0)$.

A incerteza experimental combinada associada a essas medidas será dada pela Equação (G.20):

$$\delta k = \sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial Q_{sonda}} \delta Q_{sonda}\right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial S} \delta S\right)^2} \quad (G.23)$$

$$\delta k = \sqrt{\left(\frac{1}{4\pi S} \delta Q_{sonda}\right)^2 + \left(\frac{Q_{sonda}}{4\pi S^2} \delta S\right)^2} \quad (G.24)$$

onde a incerteza experimental da inclinação da reta será dada pelo desvio-padrão dos dados experimentais e a incerteza experimental do calor fornecido pela sonda, δQ_{sonda} , será dada por:

$$\delta Q_{sonda} = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_{sonda}}{\partial P_{fioaquecedor}} \delta P_{fioaquecedor}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{sonda}}{\partial L_{fio-sonda}} \delta L_{fio-sonda}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{sonda}}{\partial L_{sonda}} \delta L_{sonda}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{sonda}}{\partial L_{fioaquecedor}} \delta L_{fioaquecedor}\right)^2} \quad (G.25)$$

ou,

$$\delta Q_{sonda} = \sqrt{\left(\frac{L_{fio-sonda}}{L_{sonda}} \delta P_{fioaquecedor}\right)^2 + \left(\frac{P_{fioaquecedor}}{L_{sonda}} \delta L_{fio-sonda}\right)^2 + \left(\frac{P_{fioaquecedor} L_{fio-sonda}}{L_{sonda}^2} \delta L_{sonda}\right)^2 + \left(\frac{P_{fioaquecedor} L_{fio-sonda}}{L_{fioaquecedor} L_{sonda}} \delta L_{fioaquecedor}\right)^2} \quad (G.26)$$

Para a Equação (G.26) a incerteza da potência fornecida pelo fio aquecedor é dada pela Equação (G.18) e as incertezas do comprimento do fio inserido na sonda, $\delta L_{fio-sonda}$, e da sonda, δL_{sonda} , serão assumidos como a metade da menor divisão da escala utilizada, ou seja, 0,5mm.

G.6 Incertezas experimentais na determinação dos coeficientes de transferência de calor:

O coeficiente médio de transferência de calor por convecção foi determinado pela inclinação da curva $\ln[(T-T_{ar})/(T_0-T_{ar})] \times t$:

$$h_{conv} = -\tau \frac{mc_p}{A_{bloco}}, \quad (G.27)$$

onde τ é a inclinação da reta obtida experimentalmente.

A incerteza combinada experimental será dada por:

$$\delta h_{\text{conv}} = \sqrt{\left(\frac{\partial h_{\text{conv}}}{\partial \tau} \delta \tau\right)^2 + \left(\frac{\partial h_{\text{conv}}}{\partial m} \delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial h_{\text{conv}}}{\partial c_p} \delta c_p\right)^2 + \left(\frac{\partial h_{\text{conv}}}{\partial A_{\text{bloco}}} \delta A_{\text{bloco}}\right)^2} \quad (\text{G.28})$$

Ou seja,

$$\delta h_{\text{conv}} = \sqrt{\left(\frac{mc_p}{A_{\text{bloco}}} \delta \tau\right)^2 + \left(\tau \frac{c_p}{A_{\text{bloco}}} \delta m\right)^2 + \left(\tau \frac{m}{A_{\text{bloco}}} \delta c_p\right)^2 + \left(\tau \frac{mc_p}{A_{\text{bloco}}^2} \delta A_{\text{bloco}}\right)^2} \quad (\text{G.29})$$

Como os coeficientes globais de transferência de calor para o bloco polido e para o bloco preto foram obtidos de forma semelhante ao coeficiente de transferência de calor por convecção, tem-se que as incertezas experimentais dessas medidas são:

$$\delta h_{\text{global}}^{\text{polido}} = \sqrt{\left(\frac{mc_p}{A_{\text{bloco}}} \delta \lambda\right)^2 + \left(\lambda \frac{c_p}{A_{\text{bloco}}} \delta m\right)^2 + \left(\lambda \frac{m}{A_{\text{bloco}}} \delta c_p\right)^2 + \left(\lambda \frac{mc_p}{A_{\text{bloco}}^2} \delta A_{\text{bloco}}\right)^2} \quad (\text{G.30})$$

$$\delta h_{\text{global}}^{\text{preto}} = \sqrt{\left(\frac{mc_p}{A_{\text{bloco}}} \delta \eta\right)^2 + \left(\eta \frac{c_p}{A_{\text{bloco}}} \delta m\right)^2 + \left(\eta \frac{m}{A_{\text{bloco}}} \delta c_p\right)^2 + \left(\eta \frac{mc_p}{A_{\text{bloco}}^2} \delta A_{\text{bloco}}\right)^2} \quad (\text{G.31})$$

onde a incerteza para a massa, δm , é igual a 1% da leitura (balança de precisão, MARTE AS 5500C), a incerteza da área do bloco é dada pela Equação (G.12) e as incertezas das inclinações das retas são dadas pelo desvio-padrão dos dados obtidos experimentalmente. Como o calor específico do alumínio foi assumido como um valor constante, sua incerteza pode ser desprezada.

A Tabela G.1 traz um resumo dos cálculos das incertezas.

Tabela G.1 – Resumo das incertezas padrão combinada para a grandezas utilizadas.

Grandeza		Incertezas						
		Incertezas padrão		Incertezas padrão combinadas		Equação de referência		
		absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)			
Massa	M(kg)	1% da medida	1,0			Inf.fab.		
Comprimento	L (m)	0,0005	0,10			½ MDE		
Altura	H (m)	0,0005	0,20			½ MDE		
Raio	Bloco	R _{bloco} (m)	0,0005	0,32			½ MDE	
	Cilindro	R _{cil} (m)	0,0005	1,9			½ MDE	
Área superfícies do forno (maior superfície)		As(m ²)			0,00035	0,14	[G.11]	
Área do bloco de alumínio		A _{bloco} (m ²)			0,00049	0,64	[G.12]	
Tensão	Fonte fio aquecedor	U(V)	0,05	0,52			½ MDE	
	Fonte Forno		0,5					
Corrente	Forno	i (A)	0,005				½ MDE	
	Fio aquecedor		0,005	3,3				
Potência	Fio aquecedor	P _{fioaquecedor} (W)			0,046	3,3	[G.18]	
	Forno*	A	P _{forno} (W)			2,93	0,43	[G.17]
		B				3,07	0,41	
		C				3,02	0,42	
		D				3,4	0,4	
Difusividade térmica		α (m ² /s)			1,78.10 ⁻⁸	7,47	[G.21]	
Inclinação da reta m		m (1/s)	5,68.10 ⁻⁵	6,4			Exp.	
Condutividade térmica		K(W/m ² °C)			8,65.10 ⁻²	9,4	[G.24]	
Inclinação da reta s		Is(°C/s)	0,39	9			Exp.	
Calor fornecido pela sonda		Q _{sonda} (W/m ²)			0,17	3,4	[G.26]	
Coeficiente de transferência de calor	h _{conv}	h(W/m ² °C)			0,48	1,8	[G.29]	
	h _{global} ^{prata}				0,98	2,5	[G.30]	
	h _{global} ^{preto}				4,13	4,7	F[G.31]	

* Potências totais referentes aos testes da Tabela 4.5: A = potência do forno para os testes 1,2,3 e 4; B= potência do forno para os testes 5,6,7 e 8; C= potência do forno para os testes 9,10,11 e 12; D= potência do forno para os testes 13,14,15 e 16 .

* Exp.: experimentalmente.; inf.fab.: informação do fabricante.