GILMAR MICHEL QUEIROZ

**“DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES
TERMOFÍSICAS DO PÃO TIPO FRANCÊS
DURANTE O PROCESSO DE ASSAMENTO”**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.**

São Paulo

2001

GILMAR MICHEL QUEIROZ

**“DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES
TERMOFÍSICAS DO PÃO TIPO FRANCÊS
DURANTE O PROCESSO DE ASSAMENTO”**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Química

Orientadora:
Carmen Cecília Tadini

São Paulo
2001

Queiroz, Gilmar Michel

Determinação de propriedades termofísicas do pão tipo francês durante o processo de assamento. São Paulo, 2001.
152p. + apêndices

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia
Química.

1. Condutividade térmica 2. Difusividade térmica 3. Pão francês. I. Universidade de São Paulo .Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Química II.t

À minha família

AGRADECIMENTOS

À *Prof. Dra. Carmen Cecília Tadini*, pela constante dedicação e incentivo.

Ao *Prof. Dr. André Gonçalves Antunha*, por emprestar a fonte de alimentação necessária no trabalho.

Ao meu irmão *José Pedro Queiroz*, pela usinagem do cilindro de alumínio e do anel de suporte da sonda.

À Eng. *Aurea Yuki Sugai* e as Ms. Eng. *Cynthia Ditchfield* e *Denise Sayuri Shigeoka* alunas da pós-graduação do Departamento de Engenharia Química EPUSP, pelos auxílios e pelos conselhos na parte experimental do trabalho.

À Eng. *Laura Gonçalves Carr*, aluna da pós-graduação do Departamento de Engenharia Química EPUSP, pelo auxílio na parte experimental do trabalho.

À *Olívia de Mendonça Furtado Pimenta*, aluna do curso de Biologia da USP e estagiária do Departamento de Engenharia Química da EPUSP, pelo auxílio na parte experimental do trabalho.

Às técnicas *Audri Lanza* e *Flávia Luzia Aparecida dos Santos*, pela importante contribuição na parte experimental do trabalho.

À todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	ix
Lista de Símbolos	xi
Resumo	xiv
“Abstract”	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 - Objetivos	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA	6
2.1.1 - Técnicas de Medição da Condutividade Térmica em Alimentos	7
2.1.2 - O Método da Sonda Linear de Aquecimento	14
2.1.2.1 - Análise Matemática do Método da Sonda Linear de Aquecimento	16
2.1.2.2 - Aplicação do Método da Sonda Linear para Determinar a Condutividade Térmica em Alimentos	20
2.2 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA	26
2.2.1 - Modelos para Estimar a Difusividade Térmica de Alimentos	27
2.2.2 - Técnicas de Medição da Difusividade Térmica em Alimentos	29
2.2.2.1 – Aplicações do Método do Uso das Curvas de Penetração de Calor para a Determinação da Difusividade Térmica em Alimentos	34
2.2.2.2 – Análise Matemática do Uso das Curvas de Penetração de Calor	40
2.3 - DENSIDADE APARENTE	48
2.3.1 - Métodos de Determinação da Densidade Aparente em Alimentos	48
2.4 – O PÃO FRANCÊS	53
2.4.1 – Ingredientes	55
2.4.1.1 - Farinha de Trigo	55

2.4.1.2 - Água	55
2.4.1.3 - Fermento	57
2.4.1.4 - Sal	57
2.4.1.5 - Açúcar	58
2.4.1.6 - Gordura	59
2.4.1.7 - Aditivos	60
3. MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1. MATÉRIAS-PRIMAS	62
3.2. EQUIPAMENTOS	62
3.3. METODOLOGIA	63
3.3.1 - Formulações	63
3.3.2 - Manufatura dos pães	63
3.3.3 - Descrição e dimensionamento da Sonda	71
3.3.4 - Ensaio da Aquisição da Temperatura no Forno	76
3.3.5 - Calibração e Operação da Sonda Linear de Aquecimento	78
3.3.6 - Análises	80
3.3.7 - Matriz de Ensaios	81
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1 - MANUFATURA DOS PÃES	82
4.2 - DIMENSÕES DOS PÃES	84
4.3 - MASSA E VOLUME DOS PÃES	86
4.4 - DENSIDADE APARENTE	95
4.5 - CONTEÚDO DE ÁGUA	99
4.6 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA DOS PÃES	105
4.7 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA EFETIVA DOS PÃES	113
4.7.1 - Coeficiente de transferência de calor convectivo do forno	113
4.7.2 - Determinação da difusividade térmica do pão francês	119
4.8 - COMPARAÇÃO DOS VALORES EXPERIMENTAIS COM OS DADOS DA LITERATURA	125
5. CONCLUSÕES	128

ANEXO A - Gráficos tempo-temperatura da glicerina e do pão francês	131
ANEXO B - Gráficos tempo-temperatura adimensional do cilindro de alumínio e do pão francês	147
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
APÊNDICE I - Equações Diferencias de Energia	
APÊNDICE II - Descrição do Termopar	
APÊNDICE III - Programa de Aquisição de Dados LabVIEW	

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Desenho do equipamento do método de Fitch (1935) para determinar a condutividade térmica. onde: i – isolante; s – amostra; l – líquido; c – cobre. Fonte: RAHMAN (1995).	11
FIGURA 2.2 - Esquema de determinação da condutividade térmica utilizada por KULACKI; KENNEDY (1978)	13
FIGURA 2.3 - Sonda de condutividade térmica construída na Universidade de Toronto. Fonte: REIDY; RIPPEN (1971).	15
FIGURA 2.4 - Aparelho de difusividade térmica usado por DICKERSON em 1965. Fonte: REIDY; RIPPEN (1971)	36
FIGURA 2.5 - Cilindro finito gerado a partir da junção de um cilindro infinito e uma placa plana.	45
FIGURA 2.6 – A: Balança de prato superior para a determinação da força de empuxo para amostra mais leve do que o líquido; B: Balança analítica para determinação da força de empuxo. Fonte: RAHMAN (1995).	49
FIGURA 2.7 - Foto do medidor de volume por deslocamento de sementes de painço, marca Chopin modelo VPP.	52
FIGURA 3.1 – Bolas de massa de 2.200g cada no período de repouso.	65
FIGURA 3.2 – Massa modelada no formato do pão.	65
FIGURA 3.3 - Fluxograma simplificado do processo de produção do pão francês pelo método direto.	67
FIGURA 3.4 - Primeira fornada: A) Ensaios com os pães retirados do forno em tempos pares; B) Ensaios com os pães retirados do forno em tempos ímpares.	69
FIGURA 3.5 - Foto da bandeja com o cilindro de alumínio com os dois termopares acoplados e a massa de pão com a pestana com os termopares inseridos	70
FIGURA 3.6 – Posição da bandeja com o cilindro de alumínio e o pão com os termopares no forno.	71
FIGURA 3.7 - Desenho esquemático da sonda linear construída no laboratório.	73
FIGURA 3.8 - Desenho esquemático do sistema utilizado para gerar calor e registrar o aumento da temperatura no pão francês.	76
FIGURA 3.9 - Foto da sonda inserida no centro geométrico do pão francês com a fonte de alimentação ajustada a uma corrente de 0,99 A.	80
FIGURA 3.10 – Pães com diferentes tempos de assamento.	80
FIGURA 4.1 – Diâmetro médio dos pães e perfil de temperatura no centro geométrico e na superfície do pão em função do tempo de assamento.	85
FIGURA 4.2 – Comprimento médio dos pães em função do tempo de assamento.	86

FIGURA 4.3 - Variação dos valores médios da massa de dois pães tipo francês ao longo do tempo de assamento a temperatura do forno pré-ajustada em 200 °C (ensaio do tipo A -tempos pares).	88
FIGURA 4.4 - Variação dos valores médios da massa de dois pães tipo francês ao longo do tempo de assamento a temperatura do forno pré-ajustada em 200 °C (ensaio do tipo B -tempos ímpares).	89
FIGURA 4.5 - Volume do pão francês durante o assamento, determinado pelo método de deslocamento de sementes de painço (ensaio do tipo A -tempos pares).	93
FIGURA 4.6 - Volume do pão francês durante o assamento, determinado pelo método de deslocamento de sementes de painço (ensaio do tipo B -tempos ímpares).	94
FIGURA 4.7 - Variação dos valores médios da densidade aparente do pão francês durante o tempo de assamento, calculada a partir dos valores obtidos de massa e volume (ensaio do tipo A - tempos pares).	98
FIGURA 4.8 - Variação dos valores médios da densidade aparente do pão francês durante o tempo de assamento, calculada a partir dos valores obtidos de massa e volume (ensaio do tipo B - tempos ímpares).	98
FIGURA 4.9 - Variação do conteúdo de água (base úmida) do pão francês durante o assamento, determinado pelo método da AACC (1995).	103
FIGURA 4.10 - Aumento da temperatura no centro geométrico do pão francês após 2 min de assamento, causado pelo aquecimento da sonda linear a uma taxa de 4,5 W/m.	105
FIGURA 4.11 – Gráfico do aumento da temperatura pelo tempo de aquecimento da sonda inserida no centro geométrico do pão francês, a uma taxa de 4,5 W/m, após 2 minutos de assamento.	106
FIGURA 4.12 - Variação da condutividade térmica do pão francês durante o tempo de assamento, pelo método da sonda linear de aquecimento.	110
FIGURA 4.13 – Superfície de resposta do modelo de condutividade térmica do pão tipo francês em função do conteúdo de água (base úmida) e da densidade aparente.	113
FIGURA 4.14 - Perfis da temperatura do forno, do centro geométrico e da superfície do cilindro de alumínio, durante o assamento.	114
FIGURA 4.15 - Temperatura adimensional do cilindro de alumínio (14 cm de comprimento e 3,5 cm de diâmetro) durante o tempo de assamento, no forno pré-ajustado a 200 °C.	115
FIGURA 4.16 - Gráfico da temperatura adimensional em função do tempo, utilizado para o cálculo do coeficiente de troca de calor (h).	117
FIGURA 4.17 - Perfis de temperatura do forno e do pão francês durante o assamento.	120
FIGURA 4.18 - Gráfico da temperatura adimensional em função do tempo de assamento para o pão francês.	121

FIGURA 4.19 - Gráfico da temperatura adimensional em função do tempo, utilizado para o cálculo difusividade térmica do pão francês.	122
FIGURA A1 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de glicerina P.A. utilizada para calibração da sonda linear a uma potência de 4,8 W/m.	131
FIGURA A2 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 10 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 11/07/00.	132
FIGURA A3 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 6 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 11/07/00.	132
FIGURA A4 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,4 W/m, data 01/08/00.	133
FIGURA A5 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,4 W/m, data 01/08/00.	133
FIGURA A6 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 7,2 W/m, data 23/08/00.	134
FIGURA A7 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 7,2 W/m, data 23/08/00.	134
FIGURA A8 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 7,2 W/m, data 28/08/00.	135
FIGURA A9 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 7,2 W/m, data 28/08/00.	135
FIGURA A10 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 10 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,7 W/m, data 09/10/00.	136
FIGURA A11 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 10 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,7 W/m, data 09/10/00.	136
FIGURA A12 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,5 W/m, data 11/01/01.	137
FIGURA A13 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,5 W/m, data 11/01/01.	137

FIGURA A14 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 12/01/01.	138
FIGURA A15 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 12/01/01.	138
FIGURA A16 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,5 W/m, data 15/01/01.	139
FIGURA A17 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,5 W/m, data 15/01/01.	139
FIGURA A18 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,7 W/m, data 16/01/01.	140
FIGURA A19 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,7 W/m, data 16/01/01.	140
FIGURA A20 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,7 W/m, data 17/01/01.	141
FIGURA A21 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,7 W/m, data 17/01/01.	141
FIGURA A22 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,2 W/m, data 18/01/01.	142
FIGURA A23 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,2 W/m, data 18/01/01.	142
FIGURA A24 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,1 W/m, data 19/01/01.	143
FIGURA A25 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,1 W/m, data 19/01/01.	143
FIGURA A26 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 22/01/01.	144
FIGURA A27 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 22/01/01.	144

FIGURA A28 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 23/01/01.	145
FIGURA A29 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 23/01/01.	145
FIGURA A30 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,0 W/m, data 24/01/01.	146
FIGURA A31 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,0 W/m, data 24/01/01.	146
FIGURA B1 – Temperatura adimensional do cilindro de alumínio em função do tempo de assamento.	147
FIGURA B2 – Temperatura adimensional do pão francês em função do tempo de assamento.	148

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Formulação básica utilizada para a produção dos pães tipo francês de 50g.	64
TABELA 3.2 - Distribuição dos pães nas bandejas de acordo com a fornada, para um ensaio em que foram processados 5 kg de farinha de trigo.	66
TABELA 4.1 - Dados de processo da manufatura dos pães tipo francês de 50g referente à etapa do amassamento.	83
TABELA 4.2 - Diâmetro e comprimento médios do pão francês de 50g, obtidos durante o assamento.	84
TABELA 4.3 – Variação da massa medida de dois pães de acordo com o ensaio e com o tempo de assamento.	87
TABELA 4.4 – Análise de variância aplicada nos valores da massa dos pães durante o assamento.	90
TABELA 4.5 – Análise de regressão linear aplicada nos valores da massa dos pães durante o assamento.	91
TABELA 4.6 - Volume de dois pães, determinado a temperatura ambiente pelo método de deslocamento de sementes de painço, de acordo com ensaio A ou B, ao longo do assamento.	92
TABELA 4.7 – Análise de variância aplicada nos valores do volume dos pães durante o assamento.	95
TABELA 4.8 – Valores de densidade aparente do pão francês durante o tempo de assamento, calculados a partir dos valores obtidos de massa e volume.	96
TABELA 4.9 – Análise de variância aplicada nos valores da densidade aparente dos pães durante o assamento.	99
TABELA 4.10 - Variação do conteúdo de água (base úmida) do pão francês ao longo do tempo de assamento, determinado pelo método da AACC (1995).	101
TABELA 4.11 – Análise de variância aplicada nos valores do conteúdo de água (base úmida) dos pães durante o assamento.	103
TABELA 4.12 – Análise de regressão linear aplicada nos valores do conteúdo de água (base úmida) dos pães durante o assamento.	104
TABELA 4.13 - Valores da condutividade térmica efetiva do pão francês obtida com o método da sonda linear.	108
TABELA 4.14 – Análise de variância aplicada nos valores de condutividade térmica dos pães durante o assamento.	111
TABELA 4.15 – Análise de regressão aplicada nos valores da condutividade térmica dos pães.	112

TABELA 4.16 - Valores do coeficiente de transferência de calor durante o assamento.	117
TABELA 4.17 - Número de Biot para o caso do assamento do pão francês.	120
TABELA 4.18 - Valores experimentais da difusividade térmica do pão francês, obtidos através das curvas de temperatura do pão durante o assamento.	124
TABELA 4.19 – Propriedades termofísicas de produtos de panificação.	126

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área superficial ou área normal ao fluxo de calor (m^2)
Bi	número de Biot (adimensional)
c	calor específico (J/ kg K)
CA, CA _u	conteúdo de água (%) e conteúdo de água (base úmida), respectivamente
Ce	constante de Euler (0,5772156649...)
d	distância entre o termopar e o fio aquecedor (m)
D	diâmetro (m)
e	distância entre o centro do cilindro e o termopar correspondente à temperatura T _e (m)
E	força de empuxo (kg m/s^2)
El	elasticidade e capacidade de favorecer o volume dos pães
f _h	parâmetro da taxa de aquecimento (s)
Ff	elevação de temperatura devido ao fator de fricção da masseira (°C)
Fo	número de Fourier (adimensional)
h	coeficiente de transferência de calor convectivo ($\text{W/ m}^2 \text{ K}$)
H	taxa de aquecimento constante (K/s)
i	corrente (A)
j	fator de correção (adimensional)
J ₀ , J ₁	funções de Bessel do primeiro tipo de ordens 0 e 1
k	condutividade térmica (W/ m K)
l	espessura da placa plana e comprimento do cilindro finito (m)
L	dimensão característica igual a R para o cilindro e metade da espessura para a placa
Lc	metade da menor dimensão do objeto (m)
m	massa (kg)
p	nível de significância
P	peso da amostra no ar (kg m/s^2) ou tenacidade ou possibilidade de absorção de água
q	taxa do fluxo de calor (W)
Q	calor fornecido pela fonte (W/m)

r	coordenada radial
R	raio (m)
R_{Ω}	resistência do fio aquecedor (Ω)
$R_{\Omega m}$	resistência por unidade de comprimento do fio aquecedor (Ω/m)
t	tempo (s)
T	temperatura (K)
U	voltagem (V)
V	volume (cm^3)
W	trabalho de deformação = força (J)
z	coordenada axial ou distância entre o ponto de medida da temperatura e o centro geométrico do cilindro

Símbolos Gregos

α	difusividade térmica (m^2/s)
β	parâmetro adimensional de erro
ϕ	porosidade
μ_m, μ_n	raízes positivas das equações transcendentais
θ	temperatura adimensional
ρ	densidade (kg/m^3)
∇	operador nabla
∇^2	laplaciano
$\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial r}$	gradientes de temperatura ao longo das direções x e r , respectivamente (K/m)
$\frac{\partial T}{\partial t}$	gradiente de temperatura ao longo do tempo (K/s)

Subscritos:

a	água
am	amostra

c	centro
cp	cobre
e	externa
f	fonte de calor
fai, faf	fatia de pão antes e depois da secagem à temperatura ambiente
fmi, fmf	fatia moída de pão antes e depois da secagem em estufa
F	farinha
i	interna
l	líquido
m	massa do pão
pi	temperatura inicial extrapolada obtida para a curva de aquecimento linearizada (K)
R	parede do cilindro
s	superfície
so	sonda
0	início
∞	ambiente

RESUMO

No presente trabalho, as propriedades termofísicas do pão francês durante o assamento foram determinadas. Os pães foram feitos na Padaria Piloto do Laboratório de Engenharia de Alimentos do Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, com formulação semelhante aos pães comercializados. Durante o assamento, mudanças profundas ocorreram nos pães como diminuição do conteúdo de água (base úmida) de 44,1 para 30,8 % e aumento do volume de 382 para 420 cm³. Devido ao aumento do volume e diminuição da massa, a densidade aparente do pão francês variou de 0,324 g/cm³ para o pão sem assamento a 0,231 g/cm³ para o pão com 14 minutos de assamento. A difusividade térmica efetiva do pão francês foi determinada a partir das curvas de penetração de calor considerando o pão como um cilindro bidimensional. As curvas foram registradas a uma taxa de 30 aquisições/minuto durante o assamento dos pães em um forno turbo com dispositivo de vaporização. O valor médio da difusividade térmica encontrada para o pão francês durante o assamento foi de $4,1 \times 10^{-7}$ m²/s. A condutividade térmica efetiva do pão francês foi determinada pelo método da sonda linear de aquecimento em diferentes tempos de assamento. A sonda linear utilizada nos ensaios foi dimensionada e construída no laboratório para o pão francês. A condutividade térmica efetiva do pão francês variou de 0,283 W/m K para o pão sem assamento a 0,136 W/m K para o pão com 14 minutos de assamento. Os resultados foram comparados com dados existentes na literatura. Um modelo empírico foi proposto para correlacionar a condutividade térmica do pão francês com o seu conteúdo de água (base úmida) e sua densidade aparente.

ABSTRACT

In this work, thermophysical properties of the french bread during baking were determined. Breads were produced at the Pilot Bakery of the Food Engineering Laboratory of the Chemical Engineering Department of Escola Politécnica of São Paulo University, with a formulation similar to breads purchased at the market. During baking, deep changes occurred in the breads such as a water content decrease from 44,1 to 30,8 % and an increase of volume from 382 to 420 cm³. Due to the increase of volume and mass decrease, the bulk density of french bread changed from 0,324 g/cm³ for the dough to 0,231 g/cm³ for the bread with 14 minutes of baking. Effective thermal diffusivity of french bread was determined through heat penetration curves in a bidimensional cylinder. Temperature history was registered at a rate of 30 samples/minute during bread baking in a turbo oven with a vaporization device. The average value of thermal diffusivity to the french bread during baking was $4,1 \times 10^{-7}$ m²/s. The effective thermal conductivity of the french bread was determined by the line heat source method in different times of baking. The thermal conductivity probe used was designed and built at the laboratory for french bread. The effective thermal conductivity of the french bread changed from 0,283 W/m K for the dough without baking to 0,136 W/m K for the bread with 14 minutes of baking. Results were compared with literature data. An empiric model was proposed to correlate the french bread thermal conductivity with its water content and bulk density.

1. INTRODUÇÃO

Acredita-se que o pão foi o primeiro alimento cozido da história. Os mais diversos e antigos povos como os egípcios, os hebreus e os romanos foram consumidores de pães. Nessas épocas os pães eram produzidos em suas próprias casas de maneira rudimentar.

Atualmente o pão é identificado como o mais universal dos alimentos porque possui espaço na alimentação de quase toda a humanidade, sendo assim um importante segmento do mercado que despertou o interesse de grandes indústrias alimentícias (CALVEL, 1987). A industrialização da fabricação do pão e produtos de panificação em geral tem evoluído muito, o que causa uma constante procura em alcançar os principais objetivos industriais como minimização do consumo de energia e aumento na produção de massas.

No Brasil, cerca de 8 milhões de toneladas de trigo ao ano são consumidas, sendo que 75% desta quantidade é destinada para a produção de farinha para atender os mercados de massas, pães, bolos, doces e biscoitos (GAZETA MERCANTIL, 1995). Entre esses produtos o pão francês é certamente o mais conhecido e o mais acessível à população, portanto, são interesses comuns os projetos de equipamentos mais econômicos e a otimização dos processos envolvidos em sua produção. Para tanto é necessário um maior conhecimento das mudanças ocorridas no pão durante a sua manufatura.

No processo de assamento o pão sofre grandes variações no volume e conteúdo de água (base úmida) causando mudanças significativas em suas propriedades termofísicas. A determinação da densidade aparente, da condutividade e difusividade

térmica efetivas durante o processo de assamento fornece informações necessárias para a melhoria dos processos que envolvem transferência de calor e massa.

Neste trabalho as propriedades termofísicas do pão francês foram determinadas durante o processo de assamento. Durante o assamento transformações profundas ocorrem na estrutura do pão, inicialmente uma massa viscoelástica tornando no final do processo uma estrutura sólida esponjosa. As variações de massa, volume e conteúdo de água que ocorrem durante o aquecimento afetam as propriedades termofísicas do pão. Este trabalho procurou determinar a variação das propriedades termofísicas do pão tipo francês ao longo do processo de assamento.

Os pães foram produzidos pelo método direto na Padaria Piloto do Laboratório de Engenharia de Alimentos do Departamento de Engenharia Química da EPUSP, com formulação semelhante aos pães comercializados. O método direto de fabricação consiste basicamente em adicionar todos os ingredientes no início ou durante o amassamento e não adicionar massa previamente fermentada. Atualmente é o método mais utilizado na produção de pães devido a sua praticidade.

A densidade aparente foi calculada pela relação entre a massa e o volume do pão francês. Essas propriedades do pão foram determinadas em diferentes tempos de assamento. O volume dos pães foi determinado pelo método de deslocamento de sementes de painço.

A condutividade térmica efetiva do pão francês foi determinada pelo método da sonda linear de aquecimento. Esse método desenvolvido em 1948, a princípio para testes em materiais de construção, tem sido amplamente utilizado para a determinação da condutividade térmica de alimentos. As principais vantagens do método da sonda linear são a rapidez de medida, baixo custo e é adequado para pequenas amostras. A sonda linear construída no laboratório consiste basicamente de um fio aquecedor que é

aquecido a uma taxa constante e de um termopar que registra o aumento da temperatura em um local próximo ao fio aquecedor. A variação da condutividade térmica do pão francês durante o assamento foi determinada pela medida dessa propriedade em diferentes tempos de assamento. Os resultados obtidos foram comparados com dados existentes na literatura. Um modelo que correlaciona a condutividade térmica com o conteúdo de água (base úmida) e a densidade aparente do pão francês foi proposto.

A difusividade térmica efetiva do pão francês foi obtida a partir das curvas de penetração de calor. As curvas de temperatura do pão francês foram registradas no centro geométrico dos pães durante o assamento em um forno turbo com dispositivo de vaporização, sendo o pão considerado um cilindro finito e o problema aproximado para o caso bidimensional. Os resultados obtidos foram comparados com dados existentes na literatura.

Tanto os dados quanto os métodos de obtenção destes serão importantes na otimização e projeto de processos envolvidos com produtos de panificação.

1.1 - Objetivos:

- Construir uma sonda para determinar a condutividade térmica efetiva do pão francês.
- Determinar massa, volume e conteúdo de água (base úmida) do pão durante o assamento.
- Correlacionar a condutividade térmica com o conteúdo de água (base úmida) e densidade aparente.
- Registrar curvas de temperatura para determinação do coeficiente de transferência de calor (h) e da difusividade térmica efetiva durante o assamento dos pães.

2. REVISÃO DA LITERATURA

As propriedades de transferência de calor e massa de alimentos têm recebido maior atenção recentemente devido a sua importância fundamental na modelagem, na otimização e nos projetos de equipamentos para processos. Antigamente, para análises de transferência de calor durante o aquecimento ou resfriamento de produtos alimentícios, eram utilizados valores constantes de propriedades térmicas. Estas análises eram muito simplificadas e imprecisas. Atualmente técnicas permitem determinar com maior precisão propriedades térmicas de alimentos de geometria irregular que variam com o tempo, a temperatura e o local do produto quando este é submetido a um processo de transferência de calor e/ou massa. Além disso, a mudança da temperatura de um produto alimentício pode causar variação significativa em suas propriedades físicas e químicas (SWEAT, 1986).

O pão é um produto obtido pela cocção, em condições técnicas adequadas, de massa preparada com farinha de trigo, fermento biológico, água e sal podendo conter outras substâncias alimentícias. No Brasil, cerca de 8 milhões de toneladas de trigo ao ano são consumidas, sendo que 75% desta quantidade é destinada para a produção de farinha para atender aos mercados de massas, pães, bolos, doces e biscoitos. No Brasil, o pão francês é o produto de mais fácil acesso e um dos mais consumidos pela população (GAZETA MERCANTIL, 1995; MADRID et al., 1996).

Durante o assamento, transformações profundas ocorrem na estrutura do pão, inicialmente uma massa viscoelástica incorporada do anidrido carbônico produzido durante a fermentação. No início do processo de assamento ocorre uma forte evaporação na superfície. Nesta etapa ocorre o desenvolvimento da massa pela expansão do anidrido carbônico presente produzido durante a etapa anterior da

fermentação. Quando a temperatura interna da massa atinge 50 a 60 °C ocorre a destruição da levedura. A partir de 70 °C ocorre a gelatinização do amido assim como a coagulação do glúten, o que provoca uma transformação profunda da massa que perde suas propriedades de plasticidade e torna-se uma estrutura sólida esponjosa. A etapa final do processo de assamento é caracterizada pela formação da crosta, que se torna espessa, e a caramelização dos açúcares residuais associada à reação desses açúcares a substâncias nitrogenadas que resultam na reação de escurecimento conhecida como reação de Maillard. No decorrer dessa mudança estrutural do pão durante o assamento ocorre simultaneamente a diminuição do teor de água e o aumento do volume. Em consequência disso, as propriedades térmicas também variam (SWEAT, 1986; CALVEL, 1987; TOLEDO, 1991).

As propriedades termofísicas que têm fundamental importância no projeto e na análise de processos e equipamentos envolvendo alimentos são a difusividade térmica, a condutividade térmica, o calor específico e a densidade. Para alimentos líquidos, estas propriedades estão disponíveis na literatura ou podem ser preditas com uma boa precisão. Entretanto em alimentos estruturados, devido a sua heterogeneidade, torna-se mais difícil a sua predição. Portanto, medidas experimentais são especialmente importantes para essa classe de produtos. No caso do pão que, durante o processo de assamento, uma massa inicialmente viscoelástica é transformada em uma estrutura esponjosa, as propriedades termofísicas estimadas ou medidas são essencialmente a condutividade térmica efetiva e a difusividade térmica efetiva, que representam a condução de calor global através da sua estrutura (BENNETT et al., 1962; TAVMAN et al., 1997).

Neste trabalho, medidas experimentais da difusividade térmica efetiva, da condutividade térmica efetiva e da densidade aparente do pão tipo francês durante o

processo de assamento foram realizadas. A seguir serão descritas essas propriedades e seus métodos de determinação.

2.1 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica é uma propriedade do material que descreve a taxa com que o fluxo de calor escoa sob a influência de um gradiente de temperatura e pode ser predita pela Lei de Fourier da condução de calor, conforme segue (RAHMAN, 1995):

$$q = k \times A \times \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

onde:

q - taxa de calor (W)

A - área da transferência de calor normal ao fluxo de calor (m^2)

k - constante de proporcionalidade conhecida como condutividade térmica (W/m K)

$\frac{\partial T}{\partial x}$ - gradiente de temperatura ao longo da direção do fluxo (K/m)

Em alimentos, que são compostos de várias substâncias em diferentes estados, o calor transferido por condução ocorre de várias formas. O efeito resultante da temperatura sobre a condutividade térmica não é facilmente estabelecido pelo emprego do conhecimento básico dos mecanismos de transferência de calor em sólidos, líquidos e gases. Além disso, o aumento da temperatura em produtos alimentícios pode causar várias mudanças em suas propriedades físicas e químicas. Assim, a condutividade térmica de alimentos depende tanto da sua composição, como de qualquer fator que afeta o fluxo de calor através do material como: a porosidade, a forma, o tamanho, o arranjo dos poros, a orientação das fibras em carnes congeladas etc. (SWEAT, 1986; KAZARIAN; HALL, 1965 apud PARK et al., 1999).

A condutividade térmica de alimentos e sua relação com o conteúdo de água é uma das mais importantes propriedades de transporte requeridas para modelar processos em que massa e energia são trocados. Típicos exemplos são os processos de secagem, os processos de rehidratação e a predição da umidade limite em embalagens de alimentos desidratados durante o armazenamento. A condutividade térmica depende da fração volumétrica e da condutividade térmica dos sólidos, da água e do ar contidos no pão. Como o conteúdo de água e o volume do pão mudam continuamente durante o assamento, as propriedades termofísicas também mudam (BAKSHI; YOON, 1984; WANG; BRENNAN, 1992).

2.1.1 - Técnicas de Medição da Condutividade Térmica em Alimentos

Para determinar a condutividade térmica de materiais alimentícios existem numerosas técnicas que são divididas em três grandes grupos: as técnicas de medição em estado estacionário, as técnicas de medição em estado semi-estacionário e as técnicas em estado transiente.

As vantagens dos métodos de medição em estado estacionário são a simplicidade das equações matemáticas e o alto grau de controle das variáveis experimentais que geram resultados bastante precisos. Em contrapartida, existem desvantagens: o longo tempo para atingir o estado estacionário (até várias horas), a necessidade de geometria definida da amostra, a eventual migração da umidade da amostra devido ao longo tempo e, no caso de materiais com alto conteúdo de água, a presença do mecanismo de convecção.

LENTZ (1961) apud SWEAT et al. (1973) usou o método da placa quente protegida para determinar a condutividade térmica de amostras grandes de carnes,

gorduras e géis de gelatina. Este método requereu cerca de 1 a 2 dias para realizar a medida da condutividade térmica destes produtos. Esse mesmo método foi utilizado por SARAVACOS; PILSWORTH (1965) apud WANG; BRENNAN (1992) para obter valores precisos da condutividade térmica de géis liofilizados.

O equipamento denominado como placa quente protegida consiste de um sistema onde a amostra fica envolvida por uma fonte de calor, com as extremidades isoladas de modo a evitar a perda de calor. A solução do estado estacionário unidimensional da equação da condução de calor para materiais isotrópicos homogêneos sem geração de calor interna pode ser escrita como (RAHMAN, 1995):

$$q = \frac{k \times A \times (T_e - T_i)}{l} \quad (2.2)$$

onde:

- q - taxa do fluxo de calor (W)
- k - condutividade térmica (W/m K)
- A - área da transferência de calor normal ao fluxo de calor (m²)
- T_e, T_i - temperaturas interna e externa (K)
- l - espessura da amostra (m)

O valor de k pode ser calculado pela medida da quantidade de calor (q), as temperaturas interna e externa (T_i) e (T_e) e a espessura da amostra (l). Esse método é padronizado pela Sociedade Americana para Testes em Materiais (ASTM). No entanto, é recomendado para amostras “secas”, uma característica apresentada somente por alimentos desidratados. Mesmo com essa limitação, o método da “placa quente protegida” é freqüentemente aplicado devido a sua simplicidade (REIDY; RIPPEN, 1971).

PARK et al. (1999) projetaram e construíram um equipamento para a determinação da condutividade e da difusividade térmica de grãos em regime permanente. O equipamento consistia de um cilindro de PVC com 25 cm de diâmetro e 60 cm de altura, uma resistência fixa no eixo axial do cilindro conectada a um regulador de tensão e seis termopares tipo T dispostos radialmente no interior do cilindro, distantes dois centímetros entre si, conectados a um sistema de aquisição de dados e a um microcomputador.

As condutividades térmicas do arroz em casca (*Oryza sativa*) e do trigo (*Tricutum aestivum*) foram calculadas pela equação:

$$k = \frac{q \times \ln(R_e / R_i)}{2 \times \pi \times e \times (T_e - T_i)} \quad (2.3)$$

onde:

T_e, T_i - temperaturas externa e interna (K)

k - condutividade térmica (W/m K)

q - taxa do fluxo de calor (W)

R_e, R_i - raios externo e interno (m)

e - distância entre o centro do cilindro e o termopar correspondente à T_e
(m)

No caso do pão, técnicas de medição da condutividade térmica em estado estacionário não poderiam ser aplicadas. Isso porque, além do significativo conteúdo de água (base úmida) (cerca de 30%) ocorrem mudanças significativas na estrutura do material durante o assamento, além do curto tempo total do processo para o pão francês de 50 g que é cerca de 20 minutos.

As técnicas de medição da condutividade térmica em estado semi-estacionário são baseadas na transferência de calor através da amostra de acordo com a seguinte equação simplificada (FITCH, 1935 apud RAHMAN, 1995):

$$\frac{A \times k \times (T - T_f)}{l} = m_{cp} \times c_{cp} \times \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

onde:

A - área superficial (m^2)

T , T_f - temperatura e temperatura da fonte de calor (K)

k - condutividade térmica (W/m K)

l - espessura da amostra (m)

m_{cp} - massa do conector de cobre (kg)

c_{cp} - calor específico do cobre (J/ kg K)

t - tempo (s)

$\frac{\partial T}{\partial t}$ - gradiente de temperatura em relação ao tempo (K/s)

com a condição inicial:

$t = 0, T = T_0$, que fornece a solução:

$$\ln\left(\frac{T_0 - T_f}{T - T_f}\right) = \frac{A \times k \times t}{l \times m_{cp} \times c_{cp}} \quad (2.5)$$

A condutividade térmica pode ser calculada da inclinação do gráfico

$$\ln\left[\left(\frac{T_0 - T_f}{T - T_f}\right)\right] \text{ em função de } t.$$

O método de Fitch é um dos métodos mais comuns usados para medir a condutividade térmica de condutores pobres. Consiste de uma fonte de calor ou recipiente na forma de um vaso preenchido com um líquido à temperatura constante e

um outro recipiente na forma de um conector de cobre isolado por todos os lados, exceto um (Fig. 2.1). A amostra é disposta como um sanduíche entre o vaso e a face não isolada do conector.

FIGURA 2.1 - Desenho do equipamento do método de Fitch (1935) para determinar a condutividade térmica. onde: i – isolante; s – amostra; l – líquido; c – cobre. *Fonte: RAHMAN (1995).*

BENNETT et al. (1962) utilizaram o método de Fitch para determinar a condutividade térmica de laranjas e toranjas. Os autores encontraram, entre as variações estudadas, que uma espessura da amostra igual a 0,25 in (0,635 cm), um tempo de 20 minutos de experimento, uma temperatura da placa de 130 °F (54,4 °C) e do conector de cobre de 78 °F (25,5 °C) resultariam num menor erro experimental com um alto nível de significância para o aparelho de Cenco-Fitch modificado.

ZURITZ et al. (1989) apud RAHMAN (1995), aplicando a técnica mencionada acima, afirmaram que a equação 2.5 só seria válida para pequenas amostras alimentícias

se as seguintes hipóteses fossem adotadas: resistência do contato desprezível; armazenamento de calor na amostra desprezível (ou seja, transferência de calor na amostra no estado semi-estacionário); transferência de calor nos extremos da amostra e no conector de cobre desprezível; temperatura da fonte de calor ou vaso constante; mesma temperatura inicial do conector de cobre e da amostra; distribuição uniforme da temperatura no conector de cobre; amostra homogênea; história da temperatura linear num gráfico semi-log durante o tempo do experimento.

KULACKI; KENNEDY (1978) empregaram o método da placa única para determinar a condutividade térmica de massa de biscoito. O equipamento consistia de um conjunto de placas parcialmente imersas num banho de água a temperatura constante que serviu como reservatório de calor, conforme ilustra a Figura 2.2. A placa do meio continha a amostra da massa e a placa superior, referenciada como a placa fria, foi mantida à temperatura constante, abaixo daquela do reservatório de calor. Os resultados desse estudo indicaram que a condutividade térmica da massa de biscoito é moderadamente dependente da temperatura e foram reportados os seguintes valores: para a massa de biscoito conforme a formulação recomendada pela Associação Americana de Química de Cereais (AACC), o valor obtido de k foi de $0,405 \pm 0,022$ W/m K no intervalo de temperatura entre $297,5 \leq T \leq 318,0$ K e para a massa de biscoito tipo “hard-sweet”, o valor encontrado da condutividade térmica foi de $0,390 \pm 0,037$ W/m K para o intervalo de temperatura entre $297,0 \leq T \leq 308,5$ K.

FIGURA 2.2 - Esquema de determinação da condutividade térmica utilizada por KULACKI; KENNEDY (1978).

Entre os métodos de medição em estado transiente, o método da sonda linear tem sido amplamente utilizado para produtos alimentícios devido a sua *conveniência* – a aparelhagem é de fácil transporte, uma vez que um computador portátil pode ser a maior parte do equipamento; *rapidez* – em pouco tempo é obtida uma medida confiável e com boa precisão; *baixo custo* – quando comparado aos outros métodos que requerem equipamentos mais sofisticados; e *adequado para pequenas amostras* – é possível dimensionar a sonda de acordo com o tamanho da amostra e não adequar a amostra ao aparelho (RAHMAN, 1995; PARK et al., 1997).

Assim sendo, o método da sonda linear tornou-se o mais adequado para ser desenvolvido no presente trabalho.

2.1.2 - O Método da Sonda Linear de Aquecimento

O primeiro desenvolvimento da sonda linear foi realizado em 1948 pelo Dr. VAN der HELD, pesquisador da Universidade de Utrecht na Holanda. O objetivo foi desenvolver um instrumento de engenharia que fosse útil nos testes de materiais isolantes de construção, de sólidos úmidos em locais naturais e de outros sólidos úmidos e secos.

O instrumento, chamado de sonda de condutividade térmica, foi desenvolvido na Universidade de Toronto após modificações e é ilustrado na Figura 2.3. Consistia de um tubo de alumínio, onde internamente havia um fio de resistência elétrica constantan axial, isolado ao longo de seu comprimento e fixado no tubo na extremidade final. Uma corrente elétrica, ao passar por este fio, providenciava uma fonte de calor à taxa constante. A extremidade inferior do tubo foi fechada com um conector pontudo. Dentro do tubo, próximo ao centro do seu comprimento, foram posicionadas juntas quentes de termopares. Estas juntas foram ligadas em série com juntas frias externas para obter as temperaturas através de medidas potenciométricas (HOOPER; LEPPER, 1950).

A sonda linear consiste basicamente de um fio aquecedor e um sensor de temperatura. Entre os sensores de temperatura os mais utilizados são os termopares. Embora existam outros tipos de sensores de temperatura com melhor precisão e/ou exatidão, os termopares são preferidos porque apresentam diversas vantagens: grande variedade de tamanhos, facilidade para instalar, durabilidade e baixo custo. O fio de constantan é o mais utilizado como elemento aquecedor no método da sonda linear, pois possui uma alta resistência elétrica que praticamente não varia com a temperatura (MURAKAMI et al., 1996a; GOEDEKEN et al., 1998).

FIGURA 2.3 - Sonda de condutividade térmica construída na Universidade de Toronto.

Fonte: REIDY; RIPPEN (1971).

REIDY; RIPPEN (1969) apud SWEAT; HAUGH (1974) apresentam uma revisão dos métodos empregados para determinar a condutividade térmica de alimentos e favorecem o uso do método da sonda linear devido a sua simplicidade e rapidez da medida.

A técnica baseia-se na inserção da sonda linear de aquecimento no centro geométrico de uma amostra alimentícia que está inicialmente à temperatura uniforme. A sonda é aquecida, a uma taxa constante, e a temperatura adjacente à sonda linear de aquecimento é medida. 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 escala mono-log e a condutividade térmica pode ser determinada.

2.1.2.1 - Análise Matemática do Método da Sonda Linear de Aquecimento

A teoria da técnica da sonda linear de aquecimento foi baseada na condução de calor em estado transiente num meio infinito e é expressa pela seguinte equação em coordenadas cilíndricas com fluxo de calor unidimensional e propriedades constantes (APÊNDICE I):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) \quad (2.6)$$

onde:

T - temperatura (K)

t - tempo (s)

r - raio do cilindro (m)

α - difusividade térmica (m^2/s)

$\frac{\partial T}{\partial t}$ - gradiente de temperatura em relação ao tempo (K/s)

$\frac{\partial T}{\partial r}$ - gradiente de temperatura ao longo da direção radial (K/m)

sujeita a seguinte condição inicial: $\text{em } t = 0, T = T_0$ (2.6a)

e as seguintes condições de contorno: $\text{em } r = 0, \left. \frac{r\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = -\frac{Q}{2 \times \pi \times k}$ (2.6b)

$$\text{em } r = R, \left. -k \frac{r\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = 0 \quad (2.6c)$$

onde:

Q - calor fornecido pela fonte (W/m)

k - condutividade térmica (W/m K)

A equação 2.6a é uma condição temporal de uniformidade na distribuição de temperatura. A equação 2.6b é uma condição de contorno que representa o calor fornecido pela fonte no centro da amostra cilíndrica através de um aquecedor. E a última condição de contorno (2.6c) representa a ausência de troca de calor com o ambiente.

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

A solução para a equação 2.6 é (CARSLAW; JAEGER, 1959):

$$T = \frac{Q}{4 \times \pi \times k} \int_{\beta^2}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2.7)$$

onde:

$$u = \frac{d^2}{4 \times \alpha \times (t - t_0)} \quad (2.8)$$

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

$$\beta = \frac{d}{2\sqrt{\alpha \times t}} \quad (2.9)$$

onde:

t, t_0 - tempo e tempo inicial (s)

T - temperatura (K)

Q - calor fornecido pela fonte (W/m)

k - condutividade térmica (W/m K)

α - difusividade térmica (m²/s)

d - distância entre o fio aquecedor e o ponto de interesse (m) – no caso o termopar (m)

A solução analítica para a equação 2.7 é a seguinte (CARSLAW; JAEGER, 1959):

$$T = \frac{Q}{4 \times \pi \times k} E_1[\beta^2] \quad (2.10)$$

A função integral exponencial $E_1[\beta^2]$ é uma série infinita e pode ser expandida (ABRAMOWITZ; STEGUN, 1964):

$$T = \frac{Q}{2 \times \pi \times k} \left[-\frac{Ce}{2} - \ln(\beta) + \frac{\beta^2}{2(1!)} - \frac{\beta^4}{4(2!)} + \dots \right] \quad (2.11)$$

onde:

Ce - constante de Euler (0,5772156649...)

Essa é a equação completa ou não-truncada (eq. 2.11) da técnica da sonda linear de aquecimento. Porém, essa equação não é utilizada para o cálculo da condutividade térmica pela necessidade do conhecimento da difusividade térmica do material. Além disso, essa equação é muito complicada para muitas aplicações e deve ser simplificada para propósitos práticos (MURAKAMI et al., 1996b).

Na prática, a sonda ou o experimento é projetado de modo que o valor do parâmetro de operação β (eq. 2.9) seja mantido pequeno. Assim, se o tempo de duração do teste e a distância entre o aquecedor e o termopar forem projetados de modo a resultar num valor de β pequeno, β^2 e os termos de ordem maior poderão ser desconsiderados da equação 2.11, tornando-se:

$$T = \frac{Q}{2 \times \pi \times k} \left[-\frac{C_e}{2} - \ln(\beta) \right] \quad (2.12)$$

Essa é a equação truncada da técnica da sonda de aquecimento linear. A principal característica dessa equação é que o aumento da temperatura é linear com o logaritmo natural do parâmetro β e, portanto, a condutividade térmica pode ser determinada pela inclinação da curva. Contudo, para aplicar a equação 2.12, é necessário o conhecimento do valor da difusividade térmica do material, que geralmente não está disponível. Para contornar este problema, a equação é aplicada dentro de um intervalo de tempo $(t-t_0)$ e a equação resultante da técnica da sonda de aquecimento linear pode ser expressa como (VAN der HELD; VAN DRUNEN, 1949 apud RAHMAN, 1995):

$$T - T_0 = \frac{Q}{4 \times \pi \times k} \left[\ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \right] \quad (2.13)$$

Assim, a condutividade térmica pode ser determinada através da inclinação da curva de temperatura pelo logaritmo natural do tempo.

$$k = \frac{Q}{4 \times \pi} \left[\frac{\ln(t/t_0)}{T - T_0} \right] \quad (2.14)$$

onde:

Q - calor fornecido pela fonte (W/m)

k - condutividade térmica (W/m K)

t, t₀ - tempo, tempo inicial (s)

T, T₀ - temperatura, temperatura inicial (K)

$\left[\frac{\ln(t/t_0)}{T - T_0} \right]$ - inverso da inclinação da curva da temperatura em função do logaritmo natural do tempo (K)

O termo t₀ é arbitrariamente escolhido no gráfico tempo-temperatura, mas simplifica a análise de dados se for ajustado ao tempo correspondente ao ponto no eixo semi-log em que a curva começa a tornar-se linear.

2.1.2.2 - Aplicação do Método da Sonda Linear para Determinar a Condutividade Térmica em Alimentos

SWEAT; HAUGH (1974) discutem em seu artigo o uso de uma sonda linear adequada para medir a condutividade térmica de pequenas amostras alimentícias. Estudos anteriores indicam o uso de uma sonda de 10 in (25,4 cm) de comprimento e 1/8 in (0,3175 cm) de diâmetro para medir a condutividade térmica de salada de batata.

Essas dimensões da sonda requereram uma amostra de 2 in (5,08 cm) de diâmetro (DICKERSON; READ, 1968 apud SWEAT; HAUGH, 1974). A sonda foi usada por SWEAT (1972) apud SWEAT; HAUGH (1974) para medir a condutividade térmica de carne de frango, gelatina, batata e molho de maçã, entre outros produtos. O autor citado aponta algumas desvantagens para medir a condutividade térmica com a sonda linear. Em geral, a sonda linear não pode ser usada para medir a condutividade térmica de líquidos não viscosos devido às correntes de convecção que ocorrem ao redor da sonda. A condutividade térmica é medida somente na direção radial. A sonda linear não pode ser usada, por exemplo, para medir a condutividade térmica de carnes na direção paralela às fibras.

SWEAT et al. (1973) estudaram o efeito do tempo “post-mortem” e da temperatura sobre a condutividade térmica de carnes branca e escura de frango, empregando uma sonda de 0,032 in (0,0813 cm) de diâmetro e 1,5 in (3,81 cm) de comprimento. Um fio aquecedor de constantan de 0,003 in (0,00762 cm) de diâmetro isolado com 0,003 in de espessura de teflon foi inserido no tubo. A sonda foi inserida na amostra e mantida à temperatura uniforme. Uma corrente elétrica constante foi aplicada ao fio aquecedor e a temperatura foi adquirida a intervalos de cinco segundos por um período de dois minutos. Nesse estudo, os autores concluíram que sondas com um diâmetro de 0,032 in (0,0813 cm) e uma razão comprimento/diâmetro de 47 são condições adequadas para medir a condutividade térmica de carnes.

UNKLESBAY et al. (1981) determinaram a condutividade térmica de pão branco durante o assamento em um forno turbo e correlacionaram as propriedades físicas. A massa, dividida em bolas de 680,4 g após o amassamento, foi fermentada por 60 minutos a 36-38 °C e 80-95 % de umidade relativa, trabalhada levemente e enformada em fôrmas retangulares de dimensões 25,5 cm × 12,9 cm × 7,5 cm. Um

termopar tipo T ligado a um termômetro digital foi inserido no centro geométrico de cada pão. O pão foi submetido a uma segunda fermentação por 75 minutos, pesado e assado em forno turbo pré-ajustado a 163 °C. Quatro formas foram dispostas em posições pré-estabelecidas no forno. As temperaturas do forno foram registradas a intervalos de dois minutos. Após oito minutos, um pão foi removido do forno e a porta imediatamente fechada. O pão foi coberto com um filme de polietileno para evitar a perda de umidade. Este procedimento foi repetido para os três pães remanescentes aquecidos por 16, 32 e 48 minutos, respectivamente. Os pães foram resfriados a 20 °C por 12 horas. Uma sonda pequena desenvolvida por SWEAT; HAUGH (1974) foi usada para medir a condutividade térmica dos pães. Os pães foram mantidos a 20 °C até uma distribuição uniforme da temperatura ser atingida. As medidas da condutividade térmica foram tomadas em três posições para obter o valor médio de cada pão. Após a sonda ser inserida no pão a fonte foi ligada. A corrente variou de 225 a 243 mA e o aumento da temperatura foi registrado durante 1 minuto a intervalos de cinco segundos.

Os autores concluíram nesse trabalho que nenhuma diferença significativa ($p < 0,10$) na condutividade térmica em relação ao tempo de assamento foi encontrada. A leve diminuição nos valores de k poderia ser associada com o aumento da quantidade de ar no pão ($0,72 \pm 0,04$ W/m °C a 8 min de assamento e $0,64 \pm 0,02$ W/m °C a 32 min de assamento).

BAKSHI; YOON (1984) determinaram a condutividade térmica de bisnagas durante o processo de assamento por meio de uma sonda linear. A massa foi preparada a partir de uma formulação básica com quatro diferentes enzimas amilolíticas: bacteriana, fúngica A, fúngica B e amilase de cereal. A massa foi fermentada por 90 minutos a 31-34 °C, dividida e moldada em esferas de 33 g cada. As peças foram fermentadas por 60

minutos e assadas em forno a 210 °C por 10 minutos. No primeiro assamento, amostras de dois pães foram retiradas a intervalos ímpares de tempo, ou seja, 1, 3, 5, 7 e 9 minutos de assamento. No segundo assamento, os pães foram retirados a intervalos pares de tempo. A sonda linear usada nos experimentos foi uma agulha hipodérmica de 3,75 cm de comprimento com um diâmetro interno de 0,091 cm. Um fio constantan (diâmetro de 0,003 in) com isolamento de teflon foi utilizado como fio aquecedor. Um termopar tipo T foi usado para registrar a temperatura. Os autores reportaram que a condutividade térmica dos pães diminuiu com o tempo de assamento. Este efeito ocorreu devido ao aumento do volume dos pães, principalmente pelo aumento da fração volumétrica do ar existente no pão. Os autores propuseram um modelo polinomial preditivo da condutividade térmica em função da densidade e do conteúdo de água (base úmida) (eq. 2.15). A condutividade térmica das bisnagas determinada experimentalmente variou de 0,19 W/m K a 0,091 W/m K durante o processo de assamento.

$$k = 0,6792 - 0,0551 \times CA + 0,0020 \times \rho + 0,0009 \times CA^2 - 0,000024 \times CA \times \rho \quad (2.15)$$

onde:

k - condutividade térmica (W/m K)

CA - conteúdo de água (base úmida) (%)

ρ - densidade (kg/m³)

CHRISTENSON et al. (1989) determinaram a condutividade térmica de pão branco, “muffin” e biscoito utilizando a sonda linear. As dimensões desejadas das amostras foram obtidas cortando-as em formas cilíndricas. As amostras foram secas a temperatura de 21 °C a diversos conteúdos de água e armazenadas em sacolas térmicas

a temperaturas desejadas por três a quatro dias. Os autores propuseram modelos polinomiais para estimar a condutividade térmica dos pães, “muffins” e biscoitos, com coeficientes de correlação entre 0,819 e 0,917. A equação 2.16 indica que a transformação logarítmica dos valores de condutividade térmica foi apropriada para ajustar os dados obtidos dos experimentos com o pão ($R^2 = 0,881$):

$$\ln k = 6,03 - 17,7 \times CA_u - 0,061 \times T + 0,065 \times CA_u \times T + 1,0 \times 10^{-4} \times T^2 \quad (2.16)$$

onde:

k - condutividade térmica (W/m K)

CA_u - conteúdo de água (base úmida)

T - temperatura (K)

WANG; BRENNAN (1992) também utilizaram a sonda linear para determinar a condutividade térmica da batata em função do conteúdo de água (base úmida). Amostras cilíndricas da batata foram secas a vários tempos em um secador de ar quente a temperaturas do ar de 40, 50, 60 e 70 °C. As amostras parcialmente secas foram seladas em filme de polietileno e armazenadas a temperatura constante por 24 horas para assegurar um conteúdo de água (base úmida) uniforme através da amostra. A sonda linear utilizada pelos autores foi construída de acordo com SWEAT (1986). A razão comprimento/diâmetro da sonda foi maior que 25, como recomendado na literatura (SWEAT, 1986) e a razão do diâmetro da sonda em relação ao diâmetro da amostra foi 0,036, no intervalo de 0,43-0,033 recomendado por SWEAT et al. (1973) e DROUZAS; SARAVACOS (1988). Os valores de condutividade térmica diminuíram com o decréscimo do conteúdo de água (base úmida). Os resultados indicaram também que, no intervalo de temperatura estudado (40-70 °C), os valores de condutividade térmica

foram independentes da temperatura. Os autores propuseram uma equação semi-logarítmica para prever o valor da condutividade térmica em função do conteúdo de água (base úmida).

GRATZEK; TOLEDO (1993) mediram a condutividade térmica de cenoura e de batata usando a sonda linear adaptada para medidas a 130 °C. Respostas rápidas e rápido alcance da linearidade no gráfico do aumento da temperatura em função do logaritmo natural do tempo foram obtidos com uma sonda preenchida com óleo de silicone com uma junta de termopar isolada.

PARK et al. (1997) construíram um sistema de medição de condutividade térmica pelo método da sonda linear e testaram esse sistema utilizando solução de ágar e borracha de silicone. Os autores relataram que nos testes com solução de ágar os erros relativos apresentaram valores elevados. Isto ocorreu devido à presença de transferência de calor convectiva. No entanto, o sistema apresentou desempenho satisfatório nos testes com borracha de silicone, mostrando excelente linearidade nas curvas do aumento da temperatura em relação ao logaritmo natural do tempo.

Recentemente, GOEDEKEN et al. (1998) determinaram a condutividade térmica de pães com conteúdo de água entre 5 a 44 % (kg/kg, base úmida) e porosidade de 0,18 a 0,90. A determinação foi realizada em um vaso de aço inoxidável pressurizado usando o método da sonda linear entre 25 e 85 °C. Amostras da massa contendo fermento pré-misturado foram obtidas como pães de 500g de uma padaria comercial na forma congelada. A massa foi armazenada em sacos de polietileno a - 20 °C até o seu uso. Antes do uso, as peças foram removidas da embalagem, acondicionadas em fôrmas (8,9 × 11,5 × 6,4 cm), cobertas com filme plástico e descongeladas em um refrigerador a 5°C por 12 h. As peças foram fermentadas em uma câmara controlada a 33 °C por 2 a 3 horas, dependendo do grau desejado de expansão de volume, e cozidas em atmosfera de

vapor por 2 horas. O conteúdo de água das peças após cozimento foi de 44 % (base úmida). As amostras cozidas foram preparadas para medir a condutividade térmica por dois métodos, dependendo da porosidade desejada (ϕ). A sonda utilizada foi a desenvolvida por SWEAT; HAUGH (1974) com algumas modificações. A condutividade térmica do pão com um conteúdo de água de 0,44 kg H₂O/ kg de pão e porosidade de 0,73 a 25, 50 e 75°C foi monitorada como função da pressão do ar. O valor de k diminuiu quando a pressão de ar foi aumentada e então lentamente se aproximou de um valor constante, a condutividade térmica real. O efeito da pressão de ar sobre o k foi relativamente pequeno a 25 °C, mas foi maior a 75 °C, indicando uma contribuição aparente da umidade a transferência de calor a altas temperaturas.

2.2 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A relação entre a habilidade de conduzir e armazenar energia de um material é conhecida como difusividade térmica (eq. 2.17). Materiais com alto valor de difusividade térmica respondem rapidamente a mudanças térmicas em seu ambiente, enquanto materiais de pequenos valores de α respondem mais lentamente, demorando para alcançar um novo estado de equilíbrio (INCROPERA, 1996):

$$\alpha = \frac{k}{\rho \times c} \quad (2.17)$$

onde:

α - difusividade térmica (m²/s)

c - calor específico (J/kg K)

k - condutividade térmica (W/m K)

ρ - densidade (kg/m^3)

A difusividade térmica é uma importante propriedade de transporte que é 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.

O emprego da equação 2.17 para calcular o valor da difusividade térmica requer o conhecimento de valores determinados experimentalmente das três propriedades: a condutividade térmica, o calor específico e a densidade. Esta abordagem requer tempo considerável e instrumentação elaborada. Alguns pesquisadores publicaram dados de valores de propriedades térmicas de alimentos (ASHRAE, 1981 apud SINGH, 1982; SWEAT, 1974, POLLEY et al., 1980; HELDMAN; SINGH, 1981 apud SINGH, 1982; RAHMAN, 1995) e estimaram razoavelmente a difusividade térmica. Outra abordagem é conduzir experimentos que permitam a medida direta desta propriedade (SINGH, 1982).

2.2.1 - Modelos para Estimar a Difusividade Térmica de Alimentos

A difusividade térmica de um material é influenciada pelo conteúdo de água, pela temperatura, pela composição e pela porosidade. Como em muitos processos, o conteúdo de água e a temperatura de um produto podem variar consideravelmente, o valor da difusividade térmica também pode variar. Além disso, muitos produtos alimentícios não são homogêneos e a difusividade térmica pode variar de um local para outro dentro do mesmo produto. Vários modelos empíricos úteis na predição da difusividade térmica de alimentos existem na literatura. A maioria desses modelos é específica ao produto estudado. RIEDEL (1969) apud TAVMAN et al. (1997)

desenvolveu um modelo que permite prever a difusividade térmica de uma grande variedade de produtos alimentícios em função da difusividade térmica da água e do conteúdo de água (base úmida) na temperatura desejada:

$$\alpha = 0,088 \times 10^{-6} + (\alpha_a - 0,088 \times 10^{-6}) \times CA \quad (2.18)$$

onde:

α - difusividade térmica (m^2/s)

α_a - difusividade térmica da água (m^2/s)

CA - conteúdo de água (base úmida) (%)

MARTENS (1980) apud SINGH (1982) investigou a influência da água, da gordura, da proteína, do carboidrato e da temperatura na difusividade térmica de alimentos. Usando análises estatísticas, MARTENS verificou que a temperatura e o conteúdo de água são os fatores de maior influência sobre a difusividade térmica. A variação da fração sólida de gordura, da proteína e do carboidrato teve uma pequena influência sobre a difusividade térmica. Regressões múltiplas foram aplicadas em 246 valores publicados de difusividade térmica e a seguinte equação em função do conteúdo de água (base úmida) e da temperatura foi obtida:

$$\alpha = [0,057363 \times CA + 0,000288 \times (T + 273)] \times 10^{-6} \quad (2.19)$$

onde:

α - difusividade térmica (m^2/s)

CA - conteúdo de água (base úmida) (%)

T - temperatura ($^{\circ}C$)

O erro padrão da estimativa do modelo apresentado por MARTENS (1980) apud SINGH (1982) foi de $1,4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Os mesmos 246 valores foram ajustados no modelo de RIEDEL (1969) e apresentaram um erro padrão da estimativa de $1,7 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

A difusividade térmica de alimentos porosos e de grãos não pode ser predita adequadamente com simples modelos aditivos baseados somente na composição química do produto alimentício, como por exemplo o pão (MAGEE; BRANSBURG, 1995) e fatias de cebolas secas (RAPUSAS; DRISCOLL, 1995). A difusividade térmica do pão aumentou significativamente com o aumento da porosidade (ZANONI et al., 1995).

2.2.2 - Técnicas de Medição da Difusividade Térmica em Alimentos

SINGH (1982) apresenta uma revisão de algumas importantes abordagens usadas na determinação da difusividade térmica de alimentos. Entre os métodos experimentais, o autor destacou quatro técnicas mais utilizadas: estimação dos mínimos quadrados, uso de curvas de penetração de calor, uso de cartas de tempo-temperatura e uso de soluções analíticas.

1. Estimação dos mínimos quadrados. A história da temperatura é registrada no centro de um objeto de geometria bem definida, como um cilindro infinito, uma placa plana ou uma esfera. Uma solução analítica apropriada de uma equação diferencial parcial (como a equação 2.20 para uma placa infinita ou equação 2.21 para um cilindro infinito) é programada num computador para prever a temperatura a vários tempos para alguns valores arbitrariamente selecionados da difusividade térmica. Usando técnicas iterativas, o valor da difusividade térmica pode ser alterado até que a diferença

entre os valores da difusividade térmica predita e experimental se torne estatisticamente desprezível.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.21)$$

Obviamente é essencial que a condição inicial e a condição de contorno usadas na solução da equação governante sejam estritamente seguidas no experimento real.

2. *Uso de curvas de penetração de calor.* Para situações em que a amostra é exposta por um longo período de tempo, o primeiro termo da série de uma equação, como a 2.22, pode ser suficiente para estimar com boa precisão a difusividade térmica ou a temperatura do alimento em um tempo específico. A equação 2.22 é uma combinação das equações 2.20 (para placa infinita) e 2.21 (para cilindro infinito) pelo emprego da regra de Newman para obter os perfis da temperatura para um cilindro finito (CARSLAW; JAEGER, 1959; BALL; OLSON, 1957 apud SINGH, 1982):

$$\left. \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right|_{\text{cilindro finito}} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \sin \mu_m}{2\mu_m + \sin(2\mu_m)} \cos(\mu_m z) \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \exp\left(-\left(\frac{4\mu_m^2}{l^2} + \frac{\mu_n^2}{R^2}\right) \alpha t\right) \quad (2.22)$$

onde:

T - temperatura (K)

T₀, T_∞ - temperatura inicial e ambiente (K)

R - raio do cilindro (m)

r - coordenada radial

- z - distância entre o ponto de medida da temperatura e o centro geométrico do cilindro (m)
 l - comprimento do cilindro (m)
 μ_n - raízes positivas da equação transcendental $\mu_n \frac{J_1(\mu_n)}{J_0(\mu_n)} = Bi$
 μ_m - raízes positivas da equação transcendental $\mu_m \tan \mu_m = Bi$
 μ_n - raízes positivas da equação transcendental $J_0(\mu_n) = 0$
 J_0 e J_1 - Funções de Bessel de ordem zero do primeiro tipo
 α - difusividade térmica (m²/s)
 t - tempo (s)

Os valores de μ_m , μ_n , J_0 e J_1 estão tabelados em LUIKOV (1966) e SISSOM; PITTS (1988).

Para um objeto cilíndrico finito, a solução expressa pela equação 2.22 pode ser simplificada para manter somente os termos com $m=n=1$; isto é, $\mu_m = \pi/2$, $\mu_n = 2,4048$ e $J_1(2,4048) = 0,5191$. No centro do objeto cilíndrico, $z = 0$, $r = 0$ e $J_0(0) = 1,0$. Então a aproximação para longos tempos ($Fo > 0,2$, vide método 3) pode ser expressa como:

$$\left. \frac{T_c - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \right|_{\text{cilindro finito}} = 2,0396 \exp \left(- \left(\frac{\pi^2}{l^2} + \frac{(2,4048)^2}{R^2} \right) \alpha t \right) \quad (2.23)$$

onde:

- T_c - temperatura no centro da amostra (K)

BALL; OLSON (1957) apud SINGH (1982) plotaram curvas de penetração de calor obtidas experimentalmente em gráfico semi-log e indicaram a seguinte expressão:

$$t = f_h \log \left(j \frac{T_s - T_0}{T_s - T} \right) \quad (2.24)$$

onde:

$$j = \frac{T_\infty - T_{pi}}{T_\infty - T_0} \quad (2.25)$$

onde:

f_h - parâmetro da taxa de aquecimento (s)

j - fator de correção adimensional

T_{pi} - temperatura inicial extrapolada obtida para a curva de aquecimento linearizada (K)

Comparando as equações 2.23 e 2.24:

$$f_h = \frac{2,303}{\alpha} \left[\frac{(2,4048)^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{l^2} \right] \quad (2.26)$$

A equação 2.26 permite a determinação da difusividade térmica se o parâmetro de penetração de calor f_h é obtido experimentalmente do estudo de penetração de calor.

3. *Uso de cartas tempo-temperatura.* As soluções analíticas de equações diferenciais parciais governantes que descrevem a transferência de calor por condução, como a equação 2.20 para coordenadas cartesianas, foram reduzidas a cartas tempo-temperatura (SCHNEIDER, 1963 apud SINGH, 1982). Estas cartas contêm números adimensionais como números de Biot (eq. 2.27), Fourier (eq. 2.28) e temperatura

adimensional (eq. 2.29). Se a temperatura adimensional for determinada experimentalmente para um local particular dentro do objeto a um tempo conhecido, as cartas tempo-temperatura podem ser usadas para estimar o número de Fourier. A difusividade térmica pode ser determinada do número de Fourier.

$$Bi = \frac{L/k}{1/h} = \frac{hL}{k} \quad (2.27)$$

onde:

Bi - número de Biot

L - dimensão característica (m)

k - condutividade térmica (W/m K)

h - coeficiente convectivo de transferência de calor (W/m² K)

L será igual ao raio para um cilindro infinito e igual à metade da espessura de uma placa plana infinita. Para objetos de geometria finita, L é igual ao volume dividido pela área superficial.

$$Fo = \frac{\alpha \times t}{(Lc)^2} \quad (2.28)$$

onde:

Fo - número de Fourier

α - difusividade térmica (m²/s)

t - tempo (s)

Lc - metade da menor dimensão do objeto, ou seja, para um cilindro longo Lc é igual ao raio (m)

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \quad (2.29)$$

onde:

θ - temperatura adimensional

T, T_{∞} - temperatura e temperatura ambiente (K)

T_0 - temperatura inicial (K)

4. *Uso de soluções analíticas.* Se o número de Fourier for maior que 0,2, as soluções das séries como a equação 2.22 convergem rapidamente depois de um certo tempo. Assim, a temperatura determinada experimentalmente num local conhecido é usada no primeiro termo da série para calcular a difusividade térmica.

Como observado por GAFFNEY et al. (1980) apud SINGH (1982), os métodos 1, 3 e 4 apresentados anteriormente requerem medidas exatas da temperatura inicial do produto, da temperatura num local conhecido do produto e da temperatura do ambiente ao redor do alimento. O método 2 tem a vantagem de usar a inclinação de um grande número de pontos ao invés de um único para a determinação da difusividade térmica. Por isso, o método das curvas de penetração de calor tem sido o mais utilizado.

2.2.2.1 – Aplicações do Método do Uso das Curvas de Penetração de Calor para a Determinação da Difusividade Térmica em Alimentos

Muitos pesquisadores aplicaram soluções para curvas de aquecimento ou resfriamento de corpos de diferentes geometrias sob várias condições e determinaram a difusividade térmica. Estas soluções encontraram um amplo uso na indústria de enlatados. A base do método é a relação exponencial entre a mudança da temperatura do

produto e o tempo após um certo período de aquecimento, frequentemente chamado de período “lag”. A inclinação resultante da reta do gráfico da temperatura em função do tempo em escala semi-logarítmica é usada para determinar a difusividade térmica (REIDY; RIPPEN, 1971).

HURWICZ; TISCHER (1952) apud REIDY; RIPPEN (1971) usaram o caso de um recipiente cilíndrico cuja temperatura da superfície foi mantida à temperatura da autoclave durante o aquecimento, e também à temperatura constante durante o resfriamento para determinar a difusividade térmica.

DICKERSON (1965) apud REIDY; RIPPEN (1971) descreveu um equipamento que permite a determinação da difusividade térmica de alimentos, ilustrado na Figura 2.4. O método foi baseado na transferência de calor transiente em que as temperaturas da amostra aumentaram linearmente com o tempo.

As amostras foram inseridas num cilindro de bronze cromado e imerso num banho de água sob agitação e aquecido a uma taxa constante. O cilindro foi considerado de comprimento infinito e o fluxo de calor axial desprezível. A equação resultante governante foi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = H = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.30)$$

com as condições de contorno:

$$\begin{array}{lll} \text{para } t > 0, & \text{em } r = R & T = T_R = H \times t \\ & \text{em } r = 0 & \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \end{array}$$

resultando na seguinte equação:

$$\alpha = \frac{H \times R^2}{4 \times (T_R - T_c)} \quad (2.31)$$

onde:

T - temperatura (K)

T_c - temperatura no centro do cilindro (K)

T_R - temperatura na parede do cilindro (K)

t - tempo (s)

H - taxa de aquecimento constante (K/s)

α - difusividade térmica (m²/s)

r - coordenada radial

R - raio do cilindro (m)

FIGURA 2.4 - Aparelho de difusividade térmica usado por DICKERSON em 1965.

Fonte: REIDY; RIPPEN (1971).

A taxa de aquecimento é obtida pela inclinação da curva das temperaturas do lado externo e do centro geométrico do cilindro em função do tempo e a difusividade térmica é calculada pela equação 2.31.

DICKERSON comparou esta solução simples com a completa dada por CARSLAW; JAEGER (1959) e concluiu que a solução simples é aceitável para valores de $Fo > 0,55$.

KOPELMAN (1966) apud REIDY; RIPPEN (1971) simulou condições de contorno de coeficientes de transferência de calor convectivos aproximando-os ao infinito (valores altos do número de Biot). Razões comprimento/diâmetro entre 3 e 6 simplificaram os casos para problemas unidimensionais. O autor destacou as vantagens de não precisar determinar a quantidade de calor, nem a localização exata do termopar ou o tempo da repentina mudança de temperatura.

RAMASWANY et al. (1982) desenvolveram equações simples para prever valores de algumas funções transcendentais características e funções de Bessel, e com isso estimar a história da temperatura em alimentos sólidos regulares de dimensões finitas e infinitas sob estado de condução transiente com transferência de calor convectiva na superfície. As equações foram desenvolvidas para várias combinações do número de Biot (0,02 – 200) e Fourier (> 200), e para temperaturas em qualquer ponto do alimento, assim como a temperatura média mássica.

DINCER (1996) desenvolveu um modelo analítico simples a partir da equação 2.21 para a determinação da difusividade térmica de corpos cilíndricos submetidos a resfriamento. O experimento foi conduzido utilizando pepinos e uvas considerados produtos perfeitamente cilíndricos, sendo resfriados em uma câmara de resfriamento teste. Oito medidores de temperatura foram inseridos nas posições centrais de oito amostras e outros medidores foram usados para registrar as temperaturas do fundo, do

meio e do topo da câmara, bem como da entrada e da saída do ar. As mudanças de umidade relativa interna da câmara e a velocidade do fluxo do ar também foram registradas. O conteúdo de água (base úmida) inicial e final dos produtos foi determinado pela secagem das amostras em estufa a vácuo a 100 °C por 24 horas. A difusividade térmica foi determinada através dos coeficientes lineares e angulares da curva de temperatura adimensional pelo tempo.

DINCER; YILDIZ (1996) desenvolveram um modelo para a determinação da umidade e da difusividade térmica de objetos cilíndricos submetidos à fritura. A transferência de calor em frituras ocorre de fora para dentro do alimento, e ao mesmo tempo a água contida no alimento vaporiza no interior assim como na superfície do alimento e escapa através do meio de fritura. Várias mudanças físicas e térmicas ocorrem no alimento submetido ao processo de fritura: evaporação da água, elevação da temperatura do alimento ao nível desejado, elevação da temperatura da superfície para dourar e ficar crocante, mudanças nas dimensões no alimento sendo frito, remoção do óleo de fritura do sistema como um componente absorvido pelo alimento frito, reposição do óleo para compensar o óleo que foi removido e mudanças na densidade do alimento durante o processo de fritura que o mantém flutuando ou submerso (BLOCK, 1967 apud DINCER; YILDIZ, 1996).

Nesse estudo, nove salsichas de formato cilíndrico (comprimento $15 \pm 0,1$ cm e diâmetro $2 \pm 0,1$ cm) foram conduzidas em uma fritadeira com controle da temperatura e óleo de girassol foi utilizado como meio de fritura. Três termopares foram inseridos no centro de três salsichas e dois termopares foram imersos no banho de óleo. Uma das salsichas foi usada para medir o conteúdo de água (base úmida) e de óleo inicial e sua massa. Durante o processo de fritura, cinco amostras que não tinham termopares foram

retiradas do banho a cada dois minutos da fritura, para determinar as alterações dos conteúdos de água, de óleo e da massa.

As temperaturas e o conteúdo de água (base úmida) obtidos no processo de fritura a 180 °C foram transformados em adimensionais. Assim, estas distribuições dos adimensionais foram bem ajustadas por regressão usando o método dos mínimos quadrados, obtendo o valor da difusividade térmica das salsichas de $3,846 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

KOSTAROPOULOS; SARAVACOS (1997) determinaram a difusividade térmica em alimentos com baixo conteúdo de água. A difusividade térmica foi determinada diretamente em café seco congelado, batata e carnes, usando o método transiente de Dickerson e indiretamente para o amido, a farinha, o arroz e as uvas secas, usando a condutividade térmica obtida pelo método da sonda linear. As difusividades térmicas da farinha, do arroz e das uvas secas variaram de $0,42 \times 10^{-7}$ a $1,22 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. A farinha obteve os maiores valores, devido a sua menor densidade aparente – maior porosidade ($\phi = 0,65$ e $CA = 2\%$). Uma relação não-linear foi encontrada entre a difusividade térmica e o conteúdo de água para os alimentos porosos e em grãos. Esse comportamento anômalo da difusividade térmica a baixos conteúdos de água é característica desse tipo de alimentos, por exemplo em materiais com estrutura heterogênea, contendo grandes volumes de ar disperso. A difusividade térmica do ar é cerca de 150 vezes maior do que a da água líquida, ou seja, $2,25 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (do ar) e $1,45 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (da água) a 25 °C e pressão atmosférica (REIDY et al., 1987 apud KOSTAROPOULOS; SARAVACOS, 1997). Assim, é esperado que alimentos porosos de alta porosidade tenham valores maiores de difusividade térmica do que alimentos não porosos de mesmo conteúdo de água.

TAVMAN et al. (1997) aplicaram a equação 2.23 para determinar a difusividade térmica de trigo e “bulgur”, um produto de trigo. O equipamento consistia de um banho de água equipado com termostato, um cilindro de bronze cromado para as amostras, termopares e um sistema de aquisição de dados. O cilindro foi submerso no banho sob agitação, aquecido à taxa constante. A difusividade térmica foi determinada pela inclinação da curva da temperatura adimensional em função do tempo.

TELLIS-ROMERO et al. (1998) utilizaram o método de Dickerson para a determinação da difusividade térmica do suco de laranja concentrado (64,2 °BRIX e 10% de polpa). A aparelhagem experimental consistia de uma célula cilíndrica ($2,475 \times 10^{-2}$ m de raio interno e $2,485 \times 10^{-1}$ m de comprimento) feita de bronze cromado com duas tampas de nylon. Dois termopares tipo T foram fixados no centro e na superfície externa da célula. A célula com o suco foi imersa num banho termostático bem agitado, aquecido a uma taxa constante e a evolução das temperaturas na parede e no centro da célula foi monitorada. A difusividade térmica do suco de laranja foi determinada conforme o método de Dickerson. Os autores também compararam o valor da difusividade térmica experimental do suco de laranja com a difusividade térmica calculada pela equação 2.17. A difusividade térmica calculada foi menor (3,1 - 13,9%) do que a experimental.

2.2.2.2 – Análise Matemática do Uso das Curvas de Penetração de Calor

As soluções das equações diferenciais de transporte de calor, como a 2.32 para coordenadas cartesianas e 2.33 para coordenadas cilíndricas (APÊNDICE I) dependem da relação entre as resistências interna e externa à transferência de calor. Essa relação é fornecida pelo número de Biot (eq. 2.27).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.32)$$

onde:

α - difusividade térmica (m²/s)

$\frac{\partial T}{\partial t}$ - gradiente de temperatura em relação ao tempo (K/s)

$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ - gradiente de temperatura ao longo da direção x (K²/m²)

$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ - gradiente de temperatura ao longo da direção y (K²/m²)

$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ - gradiente de temperatura ao longo da direção z (K²/m²)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (2.33)$$

onde:

α - difusividade térmica (m²/s)

$\frac{\partial T}{\partial t}$ - gradiente de temperatura em relação ao tempo (K/s)

$\frac{\partial T}{\partial r}$ - gradiente de temperatura ao longo da direção r (K/m)

$\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2}$ - gradiente de temperatura ao longo da direção ϕ (K²/m²)

$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ - gradiente de temperatura ao longo da direção z (K²/m²)

$$Bi = \frac{L/k}{1/h} = \frac{hL}{k} = \frac{\text{Resistência Interna}}{\text{Resistência Externa}} \quad (2.27)$$

onde:

Bi - número de Biot

L - dimensão característica (m)

k - condutividade térmica (W/m K)

h - coeficiente convectivo de transferência de calor (W/m² K)

L será igual ao raio para um cilindro infinito e igual à metade da espessura de uma placa plana infinita. Para objetos de geometria finita, L é igual ao volume dividido pela área superficial. Segundo NIX et al. (1967) um sólido infinito pode ser considerado como um cilindro finito de razão entre o comprimento e o diâmetro igual ou maior que quatro.

Um alto número de Biot (maior que 40) significa que a resistência interna à transferência de calor é grande, e um baixo valor de Biot (menor que 0,2) significa que o material apresenta pequena resistência interna à transferência de calor, ou seja, a condutividade térmica do produto é alta. Na faixa de Biot entre 0,2 e 40, tanto a resistência interna quanto a externa devem ser consideradas. As soluções para as equações diferenciais em coordenadas cartesianas e cilíndricas são descritas a seguir (SINGH, 1992).

Caso 1. Resistência Interna Desprezível à Transferência de Calor (Bi < 0,2)

Nos casos com o número de Biot suficientemente pequeno, o problema de condução transiente pode ser aproximado pela hipótese de temperatura uniforme, e é

equacionado para um caso unidimensional da seguinte forma (SISSOM; PITTS, 1988; SINGH, 1992; INCROPERA, 1996):

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \exp\left[\left(-\frac{h \times A}{\rho \times c \times V}\right) \times t\right] \quad (2.34)$$

onde:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \quad - \text{temperatura adimensional}$$

T, T_0, T_{∞} - temperatura, temperatura inicial e temperatura ambiente (K)

t - tempo (s)

V - volume (m³)

A - área superficial (m²)

ρ - densidade (kg/m³)

c - calor específico (J/kg K)

Caso 2. Resistência Externa Desprezível à Transferência de Calor ($Bi > 40$)

Quando a resistência externa pode ser considerada desprezível, as soluções das equações 2.20 e 2.21, para casos unidimensionais, com as adequadas condições de contorno são equacionadas da seguinte forma:

$$\left. \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right|_{\text{placa plana}} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_m} (-1)^{n+1} \cos\left(\frac{\mu_m r}{z}\right) \exp\left(-\mu_m^2 \frac{4\alpha t}{z^2}\right) \quad (2.35)$$

onde:

$$\mu_m \quad - \text{raízes positivas da equação transcendental} \quad \mu_m = (2m - 1) \frac{\pi}{2}$$

$$\left. \frac{T-T_{\infty}}{T_0-T_{\infty}} \right|_{\text{cilindro infinito}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n}{\mu_n J_1(\mu_n)} J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}\right) \quad (2.36)$$

onde:

μ_n - raízes positivas da equação transcendental $J_0(\mu_n) = 0$

Caso 3. Superfície Finita e Resistência Interna e Externa à Transferência de Calor

$(0,2 < Bi < 40)$

Um cilindro finito pode ser formado pela junção de um cilindro infinito e uma placa plana (Figura 2.5), onde a espessura da placa corresponde ao comprimento do cilindro finito. Da mesma forma, pode ser feita a abordagem matemática: um balanço energético em coordenadas cartesianas e cilíndricas para superfícies infinitas, seguido da combinação das equações para obter a equivalente ao cilindro finito. As equações de condução de calor em coordenadas cartesianas e cilíndricas, com propriedades constantes do material, fluxo de calor unidimensional e sem geração interna de calor são equacionadas da seguinte forma:

$$\text{Placa:} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.20)$$

$$\text{Cilindro:} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \quad (2.21)$$

onde:

α - difusividade térmica

z - coordenada axial

$\frac{\partial T}{\partial t}$, $\frac{\partial T}{\partial z}$ e $\frac{\partial T}{\partial r}$ - incrementos de temperatura em relação ao tempo, às direções z e radial, respectivamente

FIGURA 2.5 - Cilindro finito gerado a partir da junção de um cilindro infinito e uma placa plana.

sujeito às seguintes condições de contorno:

$$\text{para } t = 0 \quad T = T_0 \quad (2.21a)$$

$$\text{para } z = 0 \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad \text{para } r = 0 \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (2.21b)$$

$$\text{para } z = l/2 \quad -k \left. \frac{\partial T}{\partial w} \right| = h[T - T_\infty] \quad \text{para } r=R \quad -k \left. \frac{\partial T}{\partial w} \right| = h[T - T_\infty] \quad (2.21c)$$

A equação 2.21a é uma condição temporal, indicando que no início em $t = 0$ a distribuição de temperatura é uniforme para qualquer z , no caso da placa, e r no caso do cilindro.

A equação 2.21b é uma condição de contorno de simetria geométrica e significa que, a amostra sendo simétrica, não ocorre fluxo de calor pela linha central dessa

amostra. E a equação 2.21c é uma condição de contorno correspondente à existência de aquecimento (ou resfriamento) por convecção e temperatura uniforme na superfície.

Assim, a solução para placa infinita e resistência interna à transferência de calor é (INCROPERA, 1996):

$$\left. \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right|_{\text{placa plana}} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4 \operatorname{sen} \mu_m}{2\mu_m + \operatorname{sen}(2\mu_m)} \exp\left(-\mu_m^2 \frac{4\alpha t}{l^2}\right) \cos(\mu_m z) \quad (2.37)$$

onde:

z - coordenada representada na Figura 2.5

l - espessura da placa na direção z

μ_m - raízes positivas da equação transcendental $\mu_m \tan \mu_m = \text{Bi}$

Os valores de μ_m estão tabelados em LUIKOV (1966).

A solução para um cilindro infinito e resistência interna à transferência de calor é:

$$\left. \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right|_{\text{cilindro infinito}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}\right) \quad (2.38)$$

onde:

r - coordenada radial

R - raio do cilindro (m)

J_0 e J_1 - Funções de Bessel de ordem zero do primeiro tipo

μ_n - raízes positivas da equação transcendental $\mu_n \frac{J_1(\mu_n)}{J_0(\mu_n)} = \text{Bi}$

Os valores de μ_n , J_0 e J_1 estão tabelados em SISSOM; PITTS (1988).

Utilizando-se a regra de Newman para combinar as equações 2.37 e 2.38 da placa plana e do cilindro infinito, a solução para um cilindro finito (sistema bi-dimensional) resulta:

$$\left. \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right|_{\text{cilindro finito}} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \sin \mu_m}{2\mu_m + \sin(2\mu_m)} \cos(\mu_m z) \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \exp\left(-\left(\frac{4\mu_m^2}{l^2} + \frac{\mu_n^2}{R^2}\right) \alpha t\right) \quad (2.39)$$

onde:

R - raio do cilindro (m)

l - comprimento do cilindro (m)

Para valores do número de Fourier (eq. 2.28) maiores ou iguais a 0,2, a equação acima pode ser aproximada pelo primeiro termo da série. Assim, $m=n=1$ implica em $\mu_m=\pi/2$, $\mu_n = 2,4048$ e $J_1(2,4048) = 0,519$. E, considerando o local o centro da amostra cilíndrica, $z=0$, $r=0$ e $J_0(0) = 1,0$, a equação 2.39 fica reduzida a equação 2.23:

$$Fo = \frac{\alpha \times t}{R^2} \quad (2.28)$$

$$\left. \frac{T_c - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right|_{\text{cilindro finito}} = 2,0396 \exp\left(-\left(\frac{\pi^2}{l^2} + \frac{(2,4048)^2}{R^2}\right) \alpha t\right) \quad (2.23)$$

onde:

T_c - temperatura no centro da amostra (K)

2.3 - DENSIDADE APARENTE

Quando o alimento é transportado, estocado ou embalado, é importante saber a densidade aparente do material. Segundo HWANG; HAYAKAWA (1980), a densidade aparente inclui o volume do material sólido, líquido e todos os poros. No caso do pão, o volume total ocupado por este conterá uma substancial proporção de ar, portanto, esta se torna a densidade de interesse.

2.3.1 - Métodos de Determinação da Densidade Aparente em Alimentos

1. *Determinação das dimensões.* A densidade aparente de materiais com geometrias regulares pode ser determinada pela massa e pelo volume que é calculado das dimensões características. Este método não é adequado para materiais moles e de geometrias irregulares (RAHMAN, 1995).

2. *Determinação da força de empuxo.* Neste método, a força do empuxo pode ser determinado do peso da amostra no ar e em um líquido. A densidade aparente pode ser calculada pela equação (RAHMAN, 1995):

$$\rho = \rho_1 \frac{P}{E} \quad (2.40)$$

onde:

ρ - densidade aparente (kg/m^3)

ρ_1 - densidade do líquido (kg/m^3)

P - peso da amostra no ar (kg m/s^2)

E - força de empuxo (kg m/s^2)

Os métodos de pesagem da amostra estão mostrados na Figura 2.6 para balança de prato superior e balança analítica. A força de empuxo é a diferença entre o peso da amostra no ar e no líquido. Dois erros geralmente podem ocorrer nesse método: troca de material sólido, líquido e gasoso entre a amostra e o líquido e flotação parcial da amostra.

FIGURA 2.6 – A: Balança de prato superior para a determinação da força de empuxo para amostra mais leve do que o líquido; B: Balança analítica para determinação da força de empuxo. *Fonte: RAHMAN (1995).*

3. Método de deslocamento de volume.

A) O volume de uma amostra pode ser determinado diretamente do volume deslocado de líquido. A diferença entre o volume inicial do líquido num cilindro graduado e o volume do líquido com a amostra imersa é o volume do material. Um fluido não molhado como o mercúrio é mais adequado para esse método (PERRY, 1973; RAHMAN 1995).

LORENZEN (1958) apud HWANG; HAYAKAWA (1980) determinou as densidades do trigo, do milho, da cevada e do arroz pelo método de deslocamento de tolueno. ROSS (1960) apud HWANG; HAYAKAWA (1980) usou o método de deslocamento de água para determinar as densidades do milho, da aveia, da soja e do trigo.

O método de deslocamento de volume de líquidos acima citado, não é aparentemente adequado para determinar densidades de biscoitos ou de produtos similares devido à alta concentração de sólidos solúveis em água e em tolueno nestes alimentos.

B) Picnômetros de comparação por ar foram usados para determinar a densidade de grãos e sementes (THOMPSON; ISAACS, 1967 apud HWANG; HAYAKAWA, 1980) e de arroz integral (WRATTEN et al., 1969 apud HWANG; HAYAKAWA, 1980). O aparelho consistia em dois cilindros idênticos, dois pistões e um medidor de pressão diferencial. O volume absoluto dos materiais alimentícios é determinado pela diferença do deslocamento do volume ajustando os pistões dos cilindros de referência e da amostra até que a medida da diferença de pressão atinja o zero. A diferença no deslocamento do volume nos dois cilindros é diretamente proporcional ao volume da amostra e é lido diretamente no picnômetro. A densidade da amostra pode ser facilmente determinada pelo volume e pela massa da amostra. Quando este método é aplicado para determinar a densidade aparente de alimentos porosos, pode resultar em valores errôneos de densidade devido a sua estrutura porosa.

C) O volume de um sólido irregular pode também ser determinado pelo método do deslocamento de areia, contas de vidro ou sementes de painço. Entre esses métodos, o

mais usado para medir a densidade aparente de produtos de panificação é o do deslocamento de sementes de painço. O equipamento consiste de duas câmaras de volumes idênticos e um cilindro graduado, conforme ilustra a Figura 2.7. As duas câmaras são ligadas em ambas as extremidades do cilindro graduado que serve como câmara da amostra e reservatório de sementes, respectivamente. Uma quantidade pré-determinada de sementes de painço é retirada do reservatório para a câmara da amostra contendo a amostra cujo volume será determinado. O volume ocupado pela amostra pode ser medido diretamente do cilindro graduado pela diferença de antes e após a amostra ser colocada na câmara (HWANG; HAYAKAWA, 1980).

Apesar do método do deslocamento de sementes de painço ser utilizado com sucesso para determinar a densidade de pães, erros podem ser introduzidos na determinação da densidade de biscoitos devido ao seu tamanho relativamente pequeno. Tem sido observado também que a densidade aparente das sementes de painço varia com o seu conteúdo de água (base úmida), introduzindo erros na determinação.

HWANG; HAYAKAWA (1980) determinaram a densidade aparente de três tipos de biscoitos por deslocamento de contas de vidro, e correlacionaram a densidade dos produtos em função da temperatura e do conteúdo de água (base úmida). Esta relação foi representada por equações multilíneas com coeficientes de correlação superiores a 0,970.

FIGURA 2.7 - Foto do medidor de volume por deslocamento de sementes de painço, marca Chopin modelo VPP.

UNKLESBAY et al. (1981) determinaram a densidade aparente de pães de fôrma através do método do deslocamento de sementes de painço. Foi usado um medidor de volume de 2475 cm^3 de capacidade para determinar o volume dos pães após o processo de aquecimento.

BAKSHI; YOON (1984) determinaram a densidade aparente de bisnagas a diferentes tempos de assamento. O volume dos pães foi determinado pelo método do deslocamento de sementes de painço, exceto os dos pães com menos de três minutos de assamento que foram determinados através de suas dimensões porque esses pães “murchavam” rapidamente após serem removidos do forno. BAKSHI; YOON (1984) relataram um rápido decréscimo na densidade aparente de $0,260 \text{ g/cm}^3$ para $0,200 \text{ g/cm}^3$ nos primeiros quatro minutos de assamento.

TAVMAN et al. (1997) determinaram a densidade aparente do trigo e de “bulgur” (um produto de trigo), medindo o volume de uma massa conhecida da amostra

num cilindro graduado, e correlacionaram a densidade em função do conteúdo de água (base úmida) como uma curva de potência com coeficiente de correlação de 0,80.

Recentemente, ROUILLÉ et al. (2000) mediram o volume de mini-baguetes de 2 cm de diâmetro produzidos de massa congelada 30 minutos após o assamento pelo método de deslocamento de sementes de painço e a razão volume/massa (volume específico) foi determinada. Os autores afirmaram que o tempo de mistura foi o fator de maior influência na qualidade do pão em termos de volume da massa, de volume de CO₂ e de volume específico (inverso da densidade) dos pães.

2.4 – O PÃO FRANCÊS

Segundo CALVEL (1984), o pão foi o primeiro prato “cozido” da história. Sua origem teria seguido à época em que o homem, para consumir os cereais sob a forma de mingaus ou um tipo de bolo achatado, encontrou um meio de moê-los e reduzi-los à forma de farinha grosseira. Imagina-se que foi uma dessas massas, esquecida por acaso sob um clima quente e úmido que, semeada de leveduras ambientes (pensa-se que no vale do Nilo), teria dado origem à fermentação do pão. A massa tendo assim fermentado teria dado a idéia a uma dona-de-casa de misturá-la a uma massa inerte para fazê-la fermentar e obter um produto mais apetecível. Assim é que se explicaria a gênese da fabricação do pão.

Apesar de tão antiga, a panificação só evoluiu após a Revolução Francesa quando o sal passou a ser incorporado à formulação do pão. Na mesma época, a mistura manual da massa obtida por amassamento e corte foi completada por uma nova etapa, o estiramento e a aeração que quando corretamente conduzida devia melhorar a formação da rede de glúten (CALVEL, 1984).

O fermento biológico utilizado em panificação surgiu no início do século XIX e foi usado marginalmente até 1840, quando começou a ser empregado sob forma de uma cultura de fermento líquida na produção do pão tipo “vienense”, o que na época o diferenciava do pão tipo “francês”, fabricado a partir do fermento natural. No início do século XX avanços na tecnologia de panificação começaram com o surgimento do amassamento mecanizado e de fornos com dispositivos de vaporização (CALVEL, 1984).

Atualmente, o pão é definido como o produto perecível que resulta do cozimento de uma massa obtida pela mistura de farinha de trigo, sal comestível e água potável, fermentada por espécies de microrganismos próprios da fermentação do pão como o *Saccharomyces cerevisiae*. Quando é elaborado com o emprego de outras farinhas, o pão é chamado pelo nome correspondente ao tipo de cereal utilizado – milho, centeio, etc. (MADRID et al., 1996).

O pão tipo francês possui a formulação básica constituída de farinha de trigo, água potável, sal e fermento biológico e outros aditivos, alguns utilizados somente no Brasil. Portanto, o pão tipo francês comercializado no Brasil possui forma, peso e formulação diferentes dos pães encontrados em outros países.

A qualidade do pão, como a maioria dos produtos alimentícios, depende em grande parte das qualidades das suas matérias-primas, portanto é importante ressaltar suas principais características.

2.4.1 – Ingredientes

2.4.1.1 - Farinha de Trigo:

É extraída da parte interior dos grãos de trigo, isto é, do endosperma. É responsável pela estrutura, forma e consistência da massa (TÁO, 1995).

Tipos de Farinha:

A farinha de trigo pode ser Especial, Comum ou Integral.

Farinha Especial: é extraída da parte central do endosperma. Apresenta tonalidade mais clara e granulação mais fina.

Farinha Comum: é obtida da parte mais externa do endosperma, próxima da casca, e por este motivo apresenta tonalidade mais escura e granulação mais grossa.

Farinha Integral: é extraída da casca, do gérmen e do endosperma. É bem mais escura e grossa.

2.4.1.2 - Água:

Deve ser potável e de dureza intermediária. É utilizada para misturar os ingredientes secos. Sua dosagem nas formulações é muito importante pois, por exemplo, no caso do pão francês, pode resultar em pães de miolo e cascas ásperos (CALVEL, 1987; TÁO, 1995; PIZZINATTO^(*)).

Funções da Água:

- Dissolve os ingredientes sólidos;

^(*)PIZZINATTO, A. (Ingredientes para o setor de panificação: uma necessidade. XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, Fortaleza). **Palestra**, 2000.

- Possibilita a gelatinização do amido e formação do glúten;
- Conduz e controla a temperatura da massa;
- Provoca a formação do meio úmido favorável ao desenvolvimento da atividade enzimática e da fermentação do pão;
- Determina a consistência final da massa contribuindo para a maciez e textura do pão;
- Fornece a umidade necessária para um tempo maior de conservação da massa.

A temperatura da água adicionada à massa deve ser controlada porque o metabolismo da levedura é fortemente influenciado pela temperatura a que é exposta. A determinação da temperatura da água (T_a) a ser adicionada leva em consideração os seguintes calores envolvidos na etapa de mistura: *calor de fricção*, gerado pelo motor da amassadeira; *calor específico* de cada ingrediente e *calor de hidratação* liberado quando uma substância sólida absorve água. No caso da temperatura da farinha ser muito alta, deve ser utilizado gelo para ajustar a temperatura final da massa, o que envolve também o *calor de fusão* (ASHRAE, 1994):

$$T_a = 2 \times T_m - T_F - Ff \quad (2.39)^{(*)}$$

onde:

T_a, T_m - temperatura da água e temperatura desejável para a massa (°C)

T_F - temperatura da farinha (°C)

Ff - elevação da temperatura devido ao fator de fricção (°C)

(*) Fonte: FMAiis Indústria de Alimentos Ltda.

Existem tabelas que relacionam a temperatura da farinha e a elevação de temperatura devido à fricção (Ff) em função da rotação da amassadeira, indicando assim a temperatura em que a água deve ser adicionada. Nessas tabelas e na equação 2.39, o calor específico, o calor de hidratação e eventualmente o calor de fusão ficam implícitos englobados em T_F .

2.4.1.3 - Fermento:

É um agente de fermentação da espécie *Saccharomyces cerevisiae* pertencente à família dos cogumelos. Possui todas as faculdades de todos os seres-vivos: respiração, reprodução etc. e na panificação, durante o processo fermentativo, produz o gás carbônico responsável, ao mesmo tempo, pela formação de alvéolos internos e pelo crescimento da massa. Os fermentos são inócuos, não alteram o sabor da massa e perdem sua ação a partir de 45 °C. (CALVEL, 1987; TÁO, 1995).

Funções do Fermento:

- É responsável pelo bom volume da massa;
- Propicia uniformidade da estrutura celular;
- Cor brilhante e maciez ao miolo;
- Maciez na textura;
- Durabilidade acentuada.

2.4.1.4 - Sal:

Deve possuir granulometria uniforme, cor clara e uniforme e não conter impurezas metálicas (CALVEL, 1987; PIZZINATTO^(*)).

^(*)PIZZINATTO, A. (Ingredientes para o setor de panificação: uma necessidade. XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, Fortaleza). **Palestra**, 2000.

Funções do Sal:

- Favorece o desenvolvimento do glúten;
- Reforça as propriedades plásticas da massa melhorando sua força;
- Facilita o manuseio da massa tornando-a menos pegajosa;
- Controla a ação de enzimas;
- Diminui um pouco a ação da atividade da fermentação embora tenha tendência a normalizá-la;
- Favorece o aspecto da crosta que na sua ausência fica muito descorada;
- Realça o sabor do pão;
- Devido as suas propriedades higroscópicas influencia na conservação do pão: em ambiente seco reduz o seu ressecamento e em ambiente úmido favorece o amolecimento da crosta.

Na massa destinada à fabricação do pão francês são utilizados quatro componentes principais: a farinha, a água, o sal e o fermento. Como ingredientes complementares são utilizados o açúcar e a gordura.

2.4.1.5 - Açúcar:

Deve ser refinado, não conter impurezas metálicas e possuir uniformidade de cor e granulometria. É o ingrediente responsável pelo aumento da velocidade da ação do fermento e proporciona a cor desejável à casca do pão. Uma quantidade exagerada resulta num pão esfarelado (TÁO, 1995; PIZZINATTO^(*)).

^(*)PIZZINATTO, A. (Ingredientes para o setor de panificação: uma necessidade. XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, Fortaleza). **Palestra**, 2000.

Funções do Açúcar:

- Confere sabor e melhora o aroma;
- Ablanda a proteína da farinha amaciando a massa;
- Abaixa o ponto de caramelização da massa permitindo que a crosta do pão adquira a cor desejada numa temperatura menor;
- Lubrifica a massa tornando-a mais fluida.

2.4.1.6 - Gordura:

As gorduras alimentícias provêm do reino animal ou vegetal. É o ingrediente responsável pela maciez do pão. Em excesso, resulta em um pão esponjoso (TÁO, 1995).

Funções da Gordura:

- Contribui para o aumento do volume do pão auxiliando na retenção do gás;
- Melhora as propriedades mecânicas da massa tornando-a menos pegajosa;
- Lubrifica as partículas de amido e proteínas quebrando a estrutura do glúten e do amido;
- Emulsifica e retém considerável quantidade de líquidos aumentando a maciez e conservação da massa.

A legislação brasileira autoriza a adição de alguns componentes auxiliares, conhecidos pelo nome de aditivos, que podem ser incorporados à farinha no moinho, ou à massa.

2.4.1.7 - Aditivos:

Possuem a função de equilibrar a atividade enzimática da farinha ou de melhorar a força da massa e sua tolerância. Podem ser de origem biológica ou química (PIZZINATTO^(*)).

Emulsificantes (polisorbato e estearoil lactilato de cálcio - CSL):

- Aumentam a absorção de água;
- Aumentam a elasticidade e a retenção do gás;
- Facilitam o manuseio da massa e possibilitam uma melhor distribuição da gordura;
- Melhoram a textura e o volume;
- Evitam a retrogradação da amilose;
- Retardam a retrogradação da amilopectina;
- Retardam o envelhecimento.

Oxidantes (ácido ascórbico):

- Reforçam as propriedades físicas da massa e aumentam sua tenacidade tornando-as menos aderentes;
- Melhoram o seu aspecto e a tolerância da massa;
- Promovem o fortalecimento do glúten;
- Atuam sobre o grupo sulfeto-hidrogênio (SH) formando pontes dissulfeto (SS) e aumentando a estabilidade e a retenção do gás.

^(*)PIZZINATTO, A. (Ingredientes para o setor de panificação: uma necessidade. XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, Fortaleza). **Palestra**, 2000.

Enzimas (α -amilase):

As amilases são de origem fúngica ou bacteriana. Facilitam a utilização do amido pelo fermento e aumentam a velocidade da fermentação.

Além das matérias-primas, a qualidade do pão também é fortemente influenciada pelo seu processo de manufatura. A estrutura e a força da massa do pão dependem predominantemente da hidratação das proteínas da farinha de trigo. As propriedades viscoelásticas do glúten (proteínas insolúveis da farinha) são desenvolvidas pela interação das proteínas da farinha durante o amassamento, etapa também conhecida como mistura. Na formação da massa é necessário transformar pequenas partículas de glúten em um sistema grande e coeso que apresenta propriedades viscosas, elásticas e coesivas. Na primeira etapa do amassamento, sob velocidade baixa, as proteínas são hidratadas interagindo durante as etapas subseqüentes com outras proteínas e com outros componentes da farinha como lipídios, sais, amido e polissacarídeos não-amiláceos formando a matriz de glúten (KULP 1995, apud SALLAS-MELLADO; CHANG, 1999).

Na segunda etapa do amassamento, sob velocidade alta, o tempo de batimento é primordial. Quando insuficiente, pode resultar em uma rede de glúten não completamente desenvolvida e quando excessivo, na destruição da rede formada. Segundo ROUILLÉ et al. (2000), o tempo de mistura é o fator de maior influência na qualidade do pão em relação ao volume da massa, ao volume de CO₂ e ao volume específico do pão.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATÉRIAS-PRIMAS:

Farinha de trigo especial, água potável, fermento biológico liofilizado, sal, açúcar, gordura vegetal e aditivos, como: polisorbato Alkamult T-80 MX, ácido ascórbico, enzima Grindamil A 10000 (α -amilase) e estearoil lactilato de cálcio P 80-20(CSL).

3.2. EQUIPAMENTOS:

- Amassadeira Lisboa MRV 40 de duas velocidades com capacidade de 25 kg de farinha.
- Anemômetro digital IOPvent, faixa de medição 0,0 - 35,0 m/s.
- Armário fechado móvel para 20 bandejas.
- Balança analítica Precision AA-250, 0,0001 g, 100/220 V, 60 Hz.
- Balança semi-analítica Mettler PE11, 0,1 g, 110-240 V, 50/60 Hz.
- Câmara de fermentação Degânia com controle de temperatura (de 20 a 120 °C) e dispositivo umidificador.
- Divisora Degânia 2200g.
- Estufa Fabbe-Primar 219, 220 V, 1400W.
- Forno turbo Degânia com controle de temperatura (de 40 a 320 °C) e dispositivo de vaporização.
- Fonte de alimentação Protek 3033B 25 V, 1,5 A.
- Modeladora Werner & Pfleiderer.
- Multímetro digital Minipa ET 2039.

- Sistema de aquisição de dados, interface National Instruments e o programa Labview 5.1 for Windows.
- Sensor de temperatura e umidade relativa HMP45C, Campbell Scientific, Inc., faixa de utilização - 40 a 60 °C (temperatura) e 0 a 100 % (umidade relativa).
- Termômetro digital IOP THERM 46, faixa de utilização -70 a 1200 °C.
- Termopares tipo T (24 AWG) Iope Instrumentos de Precisão Ltda.
- Utensílios comuns de laboratório.

3.3. METODOLOGIA:

3.3.1 - Formulações

A produção dos pães foi realizada pelo método direto – todos os ingredientes foram adicionados no início ou durante a etapa de mistura, não existindo a adição de massa previamente fermentada. Os pães do tipo francês foram produzidos na Padaria Piloto do Laboratório de Engenharia de Alimentos do Departamento de Engenharia Química da EPUSP, com composição semelhante aos pães comercializados.

3.3.2 - Manufatura dos pães

Primeiramente, foram pesados todos os ingredientes de acordo com a proporção indicada na Tabela 3.1, e colocados na amassadeira. A cada ensaio foram processados 5 kg de farinha de trigo. Com a amassadeira sob velocidade baixa, a farinha, a gordura, o fermento, o açúcar e o melhorador foram misturados até obter uma mescla homogênea dos sólidos.

TABELA 3.1 - Formulação básica utilizada para a produção dos pães tipo francês de 50g.

Ingredientes	Proporção em relação à quantidade de farinha de trigo (%)
Farinha	100
Água	56
Gordura vegetal	2
Sal	2
Açúcar	1
Fermento liofilizado	1
Melhorador	0,96

Fonte: FMaiis Indústria de Alimentos Ltda.

Ainda sob velocidade baixa, a água foi adicionada aos poucos, a uma temperatura pré-ajustada de acordo com a temperatura da farinha, de modo a obter a temperatura desejada na massa no ponto final do amassamento (ponto de véu). Obtida uma massa lisa, o batimento foi interrompido, o sal foi adicionado e, sob velocidade alta, o amassamento foi conduzido até a formação de uma massa coesa, homogênea, lisa e que se desprendia bem das mãos e das paredes da amassadeira.

A temperatura final da massa e o tempo total do batimento sob velocidade alta foram anotados. O ponto final do amassamento foi determinado pelo teste do “ponto de véu”, que consiste na percepção das características de elasticidade e extensibilidade da massa ao esticar com as mãos uma “bolinha de massa”.

Bolas de massa de aproximadamente 2.200 g cada foram dispostas em bandejas de papelão aluminizado, cobertas com filme plástico de PVC e submetidas ao período de descanso a temperatura ambiente por 30 minutos (Figura 3.1).

FIGURA 3.1 – Bolas de massa de 2.200g cada no período de repouso.

Em seguida, cada bola foi disposta na Divisora que, sob pressão, resultou em 37 peças de aproximadamente 60 g cada. A massa dos 16 pedaços que seriam utilizados para os ensaios da medida do aumento da temperatura causado pela sonda linear foi ajustada individualmente a exatamente 60g. As peças foram submetidas à modeladora para adquirirem o formato do pão como ilustra a Figura 3.2.

FIGURA 3.2 – Massa modelada no formato do pão.

Devido à capacidade limitada do forno, conjuntos de no máximo quatro bandejas com 16 pães cada foram introduzidos na fermentadora, em intervalos de 20 minutos, exceto o primeiro conjunto, ou primeira fornada, formado por apenas uma bandeja com os 16 pães selecionados para os ensaios com a sonda, conforme mostra a Tabela 3.2. As condições da fermentadora foram pré-ajustadas a 31 ± 2 °C e 97 ± 3 % de umidade relativa.

TABELA 3.2 - Distribuição dos pães nas bandejas de acordo com a fornada, para um ensaio em que foram processados 5 kg de farinha de trigo.

Fornada	Identificação das Bandejas	Número de pães por fornada
1 ^a	1	16
2 ^a	2 a 5	63 ^(*)
3 ^a	6 a 9	64

^(*) Nota: Uma posição numa das bandejas da 2^a fornada foi ocupada por um cilindro de alumínio.

Ao término de cada ciclo de fermentação, as bandejas foram retiradas e os pães submetidos ao corte da “pestana” – incisão na massa utilizando uma lâmina especial – e, em seguida, conduzidas ao forno pré-ajustado a 200 °C para assamento por aproximadamente 20 minutos.

A circulação de ar dentro do forno assegura uma distribuição uniforme de calor ao redor dos pães. Durante os primeiros instantes do assamento, vapor de água sob baixa pressão foi introduzido no interior da câmara do forno. O vapor de água tem funções importantes: favorece o desenvolvimento da massa; assegura, em grande parte, a regularidade e o pleno desenvolvimento da “pestana”; melhora o aspecto da crosta produzindo uma cor dourada (devido à caramelização do açúcar) e uma superfície

brilhante e espelhada; favorece a formação de uma crosta fina e minimiza a perda de água da massa durante o assamento.

Imediatamente após o assamento, os pães foram conduzidos a um armário fechado para o resfriamento até a temperatura ambiente, de modo a evitar a excessiva desidratação superficial.

A Figura 3.3 apresenta o fluxograma geral das etapas do processo descrito anteriormente.

FIGURA 3.3 - Fluxograma simplificado do processo de produção do pão francês pelo método direto.

O assamento foi conduzido da mesma forma que a fermentação, em etapas. A cada ensaio, o processo de assamento foi realizado em três etapas: 1^a, 2^a e 3^a fornadas.

1^a Fornada

Essa etapa consistiu no assamento de apenas uma bandeja com os 16 pães de massa ajustada individualmente a 60 g. Em intervalos de dois minutos, a partir do início do assamento, dois pães foram retirados do forno para serem submetidos posteriormente aos ensaios de aquisição do aumento de temperatura provocado pela sonda linear (item 3.3.3).

Foram realizados ensaios dos tipos A e B. Em ensaios do tipo A, a retirada dos pães foi feita em tempos pares de assamento, ou seja, a 2, 4, 6,... até 14 minutos de assamento. Em ensaios do tipo B, o procedimento foi o mesmo em tempos ímpares, ou seja, a 1, 3, 5,... até 13 minutos de assamento. A Figura 3.4 ilustra as posições dos pães na bandeja da 1^a fornada, indicando os tempos de retirada dos mesmos de acordo com o tipo de ensaio. Tanto no ensaio A quanto no ensaio B, dois pães foram retirados da bandeja antes do início do processo de assamento e denominados como pães de 0 minutos de assamento.

Todos os pães retirados da primeira fornada foram dispostos em bandejas de aço inoxidável e enrolados com filme plástico de PVC onde foram deixados até atingirem a temperatura ambiente. Contudo, aqueles pães sem assamento tiveram seus volumes medidos imediatamente após a fermentação, uma vez que o processo fermentativo não é interrompido pelo assamento, e conseqüentemente, o seu volume altera.

FIGURA 3.4 - Primeira fornada: A) Ensaios com os pães retirados do forno em tempos pares; B) Ensaios com os pães retirados do forno em tempos ímpares.

2ª Fornada

Quatro bandejas foram colocadas no forno nessa etapa, com 16 pães cada, exceto uma em que uma posição foi ocupada por um cilindro de alumínio com dimensões próximas as de um pão francês (diâmetro 3,5 cm e comprimento 14 cm, vide item 3.3.4). Dois termopares foram inseridos em um pão francês, um posicionado no seu centro geométrico e outro na superfície. Dois termopares também foram inseridos no centro geométrico e na superfície do cilindro de alumínio, conforme mostra a Figura 3.5. As posições do cilindro de alumínio e do pão com os termopares na bandeja e a posição desta na câmara do forno foram sempre as mesmas em todos os ensaios, conforme ilustrado na Figura 3.6. Um termopar foi utilizado para adquirir a temperatura do forno.

Durante todo o processo de assamento a história da temperatura da câmara do forno, do centro e da superfície do pão e do centro e da superfície do cilindro foram adquiridas através dos termopares ligados na interface da National Instruments, acoplada no computador. As temperaturas foram registradas on-line por meio do programa LabVIEW 5.1, na frequência de 30 aquisições por minuto, no total de 20 minutos de assamento. Também nos primeiros instantes, vapor de água sob baixa pressão foi introduzido na câmara do forno através do dispositivo de vaporização.

3ª Fornada

Na 3ª fornada, quatro bandejas com 16 pães cada foram introduzidas na câmara do forno e submetidas ao processo de assamento durante 20 minutos.

FIGURA 3.5 - Foto da bandeja com o cilindro de alumínio com os dois termopares acoplados e a massa de pão com a pestana com os termopares inseridos.

FIGURA 3.6 – Posição da bandeja com o cilindro de alumínio e o pão com os termopares no forno.

3.3.3 - Descrição e dimensionamento da Sonda

- Descrição da Sonda

O princípio da sonda linear é baseado em uma fonte de calor linear de comprimento infinito com fluxo de calor axial desprezível. A razão entre o comprimento e o diâmetro da sonda indica a validade dessa hipótese. HOOPER; LEPPER (1950) recomendam a razão entre o comprimento e o diâmetro da sonda de 100 para diminuir este erro. Entretanto, SWEAT; HAUGH (1974) comparando os resultados obtidos com sondas de razão entre o comprimento e o diâmetro de 93,75, 46,88 e 31,25, não encontraram diferenças significativas ($p < 0,1$), quando testadas com glicerina. Mais tarde, SWEAT (1986) estabeleceu que se essa razão fosse maior do que 25, o erro decorrente desse fator já ficaria abaixo do erro experimental.

HOOPER; LEPPER (1950), SWEAT; HAUGH (1974), GRATZEK; TOLEDO (1993), VOUDOURIS; HAYAKAWA (1995) e MURAKAMI et al. (1996b) descreveram em seus trabalhos a sonda linear de aquecimento construída com o termopar e o fio aquecedor juntos na mesma agulha. Para isso, é necessário que o fio aquecedor seja extremamente fino, assim como os fios componentes do termopar. Devido às dificuldades encontradas para construir no laboratório uma sonda com o fio aquecedor de espessura próxima a especificada nesses trabalhos, optou-se por construir a sonda com o termopar do lado externo à agulha hipodérmica (BAGHE-KHANDAN et al., 1981; PARK et al., 1997). Assim, o espaço entre o fio aquecedor e o termopar foi preenchido com a amostra e não com ar ou algum material de enchimento como feito nos trabalhos de HOOPER; LEPPER (1950), SWEAT; HAUGH (1974), GRATZEK; TOLEDO (1993), VOUDOURIS; HAYAKAWA (1995) e MURAKAMI et al. (1996b).

Uma outra modificação da sonda construída neste trabalho foi a utilização de termopares com bainhas de diâmetro de 3 mm (diâmetro dos fios 0,51 mm – 24 AWG – sem o revestimento de teflon), diâmetro superior ao diâmetro utilizado pela maioria dos autores (WANG; BRENNAN, 1992; GRATZEK; TOLEDO, 1993; DESHPANDE et al., 1996; MURAKAMI et al., 1996b; GOEDEKEN et al., 1998). Isso resultou num maior tempo de resposta dos termopares utilizados do que aqueles usados pelos autores anteriormente citados. A justificativa da utilização de termopares de 3 mm de diâmetro foi devido à maior resistência à temperatura dos fios desses termopares (APÊNDICE II), uma vez que os utilizados na construção da sonda linear de aquecimento foram também usados para a aquisição das temperaturas no forno durante o assamento.

A sonda construída no laboratório consiste de uma agulha hipodérmica de 10 cm de comprimento e diâmetro igual a 2 mm, um termopar tipo T e um anel de tecnil,

utilizado para prender a extremidade superior da agulha e o termopar, como ilustra a Figura 3.7.

A ponta da agulha hipodérmica foi selada com solda prata. Um fio de constantan revestido (32 AWG) foi inserido por dentro da agulha até a ponta, onde o fio foi dobrado e retornado até a extremidade superior. Essa extremidade foi vedada com cola Araldite, formando-se, dentro da agulha, um pequeno espaço com ar retido.

FIGURA 3.7 - Desenho esquemático da sonda linear construída no laboratório.

O termopar adquirido da Iope Instrumentos de Precisão Ltda. possui bainha de aço inoxidável com ponta atuante, ou seja, sua junta de medição está situada na ponta que foi fixada à metade do comprimento da agulha (HOOPER; LEPPER, 1950).

- Dimensionamento da sonda

O dimensionamento da sonda leva em consideração alguns parâmetros, de acordo com sua aplicação. Estas restrições são equacionadas da seguinte forma (SWEAT, 1986; RAHMAN, 1995):

- O diâmetro da amostra deve ser suficientemente grande para garantir que não ocorra troca de calor com o ambiente pelas laterais da amostra;

$$D_{am} \geq 5,2\sqrt{\alpha \times t} \quad (3.1)$$

onde:

D_{am} - diâmetro da amostra (m)

α - difusividade térmica (m^2/s)

t - tempo (s)

- Uma sonda linear infinita, com fluxo de calor axial desprezível, pode ser aproximada por:

$$\frac{L_{so}}{D_{so}} \geq 25 \quad (3.2)$$

onde:

L_{so} - comprimento da agulha hipodérmica (m)

D_{so} - diâmetro da agulha hipodérmica (m)

- O parâmetro matemático operacional (β) relaciona a duração do teste (t), a difusividade térmica do material (α) e a distância (d) entre o termopar e o fio aquecedor (eq. 2.9):

$$\beta = \frac{d}{2\sqrt{\alpha \times t}} \quad (2.9)$$

MURAKAMI et al. (1996b) mostram uma tabela do erro de truncção da equação 2.11 em função de β . De acordo com essa tabela, $\beta \leq 0,14$ assegura um erro

devido à truncção da série infinita abaixo de 0,59 %. Então, se a sonda e o experimento forem dimensionados para $\beta \leq 0,14$, a equação 2.14 pode ser aplicada.

$$k = \frac{Q}{4\pi} \left(\frac{\ln(t/t_0)}{T - T_0} \right) \quad (2.14)$$

Para o dimensionamento da sonda linear, foi empregado um valor médio da difusividade térmica do pão, encontrado na literatura (RAHMAN, 1995). O tempo de duração de cada ensaio (t) foi estipulado na ordem de 60 segundos. Assim, aplicando a equação 3.1, para $\alpha = 3,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $t = 60 \text{ s}$, o valor mínimo do diâmetro da amostra encontrado foi dois centímetros ($D_{\text{am}} \geq 2\text{cm}$).

Conforme mostra a Figura 3.7, a razão entre o comprimento e o diâmetro da agulha ($L_{\text{so}}/D_{\text{so}}$) foi 50. Ainda de acordo com a Figura 3.7, para $d = 1 \text{ mm}$, encontrado $\beta = 0,12$ (equação 2.9).

Assim, se a duração dos ensaios de aquisição do aumento da temperatura na amostra causado pelo calor introduzido pelo fio aquecedor da sonda linear for de 60 segundos, e se o diâmetro da amostra for maior do que dois centímetros, todas as restrições equacionadas por SWEAT (1986) e RAHMAN (1995) serão obedecidas, ou seja:

$$\frac{L_{\text{so}}}{D_{\text{so}}} \geq 25 \quad \beta \leq 0,14$$

A sonda utilizada obedeceu as medidas e a construção apresentada na Figura 3.7. O sistema de medição é composto além da sonda por um multímetro Minipa ET 2039, uma fonte de alimentação Protek 3033B, uma placa conversora de sinais analógico/digital e um microcomputador, como mostra a Figura 3.8. A extremidade do fio de constantan foi conectada à fonte de alimentação e ao multímetro. O termopar foi

conectado a um cabo de extensão que, por sua vez, foi ligado à placa de aquisição de dados da National Instruments. O programa utilizado para a leitura e conversão dos sinais foi o LabVIEW 5.1^(*) (NATIONAL INSTRUMENTS, 1998; NATIONAL INSTRUMENTS, 1999).

FIGURA 3.8 - Desenho esquemático do sistema utilizado para gerar calor e registrar o aumento da temperatura no pão francês.

3.3.4 - Ensaio da Aquisição da Temperatura no Forno

Apesar do alumínio possuir propriedades termofísicas completamente diferentes das do pão, este foi utilizado devido a sua não-toxicidade (não liberaria gases e nem deixaria resíduos nas bandejas) e propriedades térmicas bem conhecidas. Além disso, o

^(*) descrição no APÊNDICE III

material utilizado como modelo deveria ser sólido – para não entrar em ebulição no forno e não ocorrer convecção –, homogêneo e fácil de ser usinado – para ter a forma e dimensões desejadas. Assim, o material escolhido foi um metal. Os metais, em geral, possuem suas propriedades térmicas bem definidas por apresentar características como homogeneidade, armazenamento de calor desprezível e não ocorrer mudanças em sua estrutura com o tempo, quando exposto a temperaturas consideravelmente altas. Tais propriedades permitem a utilização de métodos de medição em estado estacionário e semi-estacionário que são mais lentos que os métodos em estado transiente, todavia mais precisos.

NIX et al. (1967) demonstraram que um sólido infinito pode ser considerado como um cilindro finito de razão entre o comprimento e o diâmetro igual ou maior que quatro.

Na 2ª fornada de cada ensaio, um cilindro maciço (tarugo) de alumínio, com 14 cm de comprimento e 3,5 cm de diâmetro foi colocado no forno, juntamente com os pães a serem assados. Dois termopares foram inseridos no cilindro, um no seu centro geométrico e outro na superfície. Analogamente, dois termopares foram inseridos no centro geométrico e na superfície do pão posicionado à direita do cilindro de alumínio. Outro termopar foi colocado no forno para a aquisição da temperatura dentro da câmara. Os termopares utilizados nos ensaios foram desenvolvidos em conjunto com o fabricante para não somente a bainha de aço inoxidável, mas também o pote – ou luva, a ligação entre a bainha do termopar e o fio de extensão – e uma parte do fio a ser inserida no forno resistissem à temperatura de 200 °C. A junção entre a bainha e o fio de extensão foi feita diretamente, sem a luva, gripando-se a extremidade da bainha para fixá-la no fio de extensão. O diâmetro do termopar aumentou para 3 mm para que seu fio de extensão resistisse à temperatura do forno.

A história da temperatura foi registrada, à taxa de 30 aquisições por minuto, ao longo do assamento do pão (aproximadamente 20 minutos).

3.3.5 – Calibração e Operação da Sonda Linear de Aquecimento

O sistema composto por fonte de alimentação, multímetro, sonda, placa conversora de sinais analógico/digital e computador foi montado conforme mostra a Figura 3.8. A sonda foi inserida num recipiente com glicerina P.A. para calibração. A fonte de alimentação foi ajustada para fornecer um valor fixo de corrente e ligada ao mesmo tempo em que a aquisição de temperatura começou a ser registrada.

O valor da voltagem indicado no multímetro foi anotado para o cálculo da resistência do fio aquecedor através da Lei de Ohm (eq. 3.3).

$$U = i \times R_{\Omega} \quad (3.3)$$

onde:

U - voltagem (V)

R_{Ω} - resistência do fio aquecedor (Ω)

i - corrente (A)

No método da sonda linear, o calor introduzido na amostra é geralmente reportado em unidade de potência por unidade de comprimento. Para isso, a resistência do fio aquecedor (R_{Ω}) foi transformada em resistência por unidade de comprimento ($R_{\Omega m}$). Então, o calor introduzido na amostra foi calculado pela seguinte equação (eq. 3.4):

$$Q = i^2 \times R_{\Omega m} \quad (3.4)$$

onde :

Q - calor introduzido por unidade de comprimento do fio aquecedor (W/m)

$R_{\Omega m}$ - resistência por unidade de comprimento do fio aquecedor (Ω/m)

i - corrente (A)

Na primeira aquisição de temperatura, a fonte de alimentação foi ajustada para fornecer um valor baixo de corrente a fim de evitar a queima do fio aquecedor da sonda. A aquisição de temperatura foi repetida, aumentando-se aos poucos a corrente e, conseqüentemente, o calor introduzido, até que um aumento de temperatura adequado (suficientemente grande para não ser confundido com ruídos na aquisição de dados) fosse obtido durante 1 minuto de ensaio. Assim, o valor da corrente foi fixado para as aquisições seguintes com a glicerina e para os ensaios com o pão francês.

Entre um aquecimento e outro provocado pela sonda, um tempo suficiente foi aguardado para que a temperatura da glicerina retornasse ao equilíbrio térmico que foi verificado através da aquisição de temperatura da glicerina até que a mesma estabilizasse.

Depois de calibrada, a sonda foi utilizada no pão. A Figura 3.9 ilustra a sonda inserida no pão francês.

Na calibração com a glicerina e nos ensaios com os pães da 1^a fornada, a temperatura foi registrada a uma frequência de 30 aquisições por minuto durante aproximadamente 60 segundos.

FIGURA 3.9 - Foto da sonda inserida no centro geométrico do pão francês com a fonte de alimentação ajustada a uma corrente de 0,99 A.

3.3.6 - Análises

A Figura 3.10 ilustra os pães retirados do forno com diferentes tempos de assamento.

FIGURA 3.10 – Pães com diferentes tempos de assamento.

- Medidas Físicas

Após atingirem a temperatura ambiente, as dimensões (comprimento e diâmetro) e massa dos pães obtidos da 1ª fornada foram medidas. O volume dos pães foi determinado, também à temperatura ambiente, pelo método de deslocamento de sementes de painço, exceto aqueles dos pães sem assamento, que tiveram seus volumes medidos imediatamente após a fermentação, uma vez que seu processo fermentativo continuaria à temperatura ambiente (UNKLESBAY et al., 1981; BAKSHI; YOON, 1984; ROUILLÉ et al., 2000).

- Conteúdo de água (base úmida)

O conteúdo de água (base úmida) dos pães obtidos na 1ª fornada foi determinado pelo método AACC (1995). O método consiste em secar fatias centrais dos pães, de aproximadamente 5 g, à temperatura ambiente por cerca de 20 horas e em estufa a 105 °C por 1 hora.

3.3.7 - Matriz de Ensaaios

Foram realizados um total de 15 ensaios. Foram consumidos 75 kg de farinha de trigo e produzidos aproximadamente 130 kg de massa e 2250 pães. As temperaturas durante o assamento foram registradas durante 10 ensaios. As análises de massa, volume, conteúdo de água (base úmida) e a aquisição do aumento de temperatura provocado pela sonda linear foram realizadas em todos os ensaios, dividindo-se em assamentos em que os pães foram retirados em tempos pares na 1ª fornada e assamentos em que os pães foram retirados em tempos ímpares.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – MANUFATURA DOS PÃES

Os dados do processo dos ensaios de manufatura dos pães realizados estão representados na Tabela 4.1. A interrupção dos experimentos de 10/09/00 até 11/01/01 foi devido à quebra da placa de aquisição de dados. No retorno dos experimentos foi utilizada uma nova farinha, porque o prazo de validade da farinha anterior tinha vencido. A nova farinha foi adquirida no mesmo moinho da anterior, porém possuía outras características, o que resultou num maior tempo de batimento elevando a temperatura final da massa.

TABELA 4.1 - Dados de processo da manufatura dos pães tipo francês de 50g referente à etapa do amassamento.

Ensaio	Data	Temperatura da Água (°C) ⁽¹⁾	Temperatura Final da Massa (°C)	Tempo de Batimento ⁽²⁾
1 tipo A ⁽³⁾	11/07/00	3,1	24,8	19 min 43 s
2 tipo B ⁽³⁾	01/08/00	5,7	24,3	21 min 23 s
3 tipo B ⁽³⁾	23/08/00	17,4	24,2	14 min 45 s
4 tipo B ⁽³⁾	28/08/00	16,0	28,6	10 min 01 s
5 tipo A ⁽³⁾	10/09/00	15,0	26,0	12 min 24 s
6 tipo A ⁽⁴⁾	11/01/01	16,0	30,0	20 min 43 s
7 tipo B ⁽⁴⁾	12/01/01	15,0	34,5	23 min 30 s
8 tipo A ⁽⁴⁾	15/01/01	15,7	33,0	22 min 07 s
9 tipo B ⁽⁴⁾	16/01/01	16,0	31,4	22 min 29 s
10 tipo A ⁽⁴⁾	17/01/01	14,3	33,9	22 min 34 s
11 tipo B ⁽⁴⁾	18/01/01	9,0	33,0	20 min 44 s
12 tipo A ⁽⁴⁾	19/01/01	11,2	32,1	21 min 35 s
13 tipo B ⁽⁴⁾	22/01/01	8,0	33,5	28 min 30 s
14 tipo A ⁽⁴⁾	23/01/01	10,0	34,0	22 min 56 s
15 tipo B ⁽⁴⁾	24/01/01	9,7	34,1	27 min 16 s

(1) Para uma temperatura final da massa desejada de 26 °C de acordo com a equação:

$$T_a = 2 \times T_m - T_F - Ff \quad (2.39)$$

(2) Tempo de batimento da massa até atingir o “ponto de véu”.

(3) Farinha de trigo com as seguintes características: CA = 14,4%, P/El=1,09; W=257×10⁻⁴ J

(4) Farinha de trigo com as seguintes características: CA = 13,7%, P/El=1,25; W=225×10⁻⁴ J

onde:

CA - conteúdo de água (base úmida) (%)

P - tenacidade ou possibilidade de absorção de água

El - elasticidade e capacidade de favorecer o volume dos pães

W - trabalho de deformação = força (J)

4.2 – DIMENSÕES DOS PÃES

O diâmetro e o comprimento dos pães produzidos na primeira fornada foram medidos com um paquímetro, após atingirem a temperatura ambiente. Valores médios e os respectivos desvios padrão estão apresentados na Tabela 4.2, sendo que o comprimento médio dos pães produzidos foi $11,73 \pm 0,70$ cm. O diâmetro médio obtido foi $5,40 \pm 0,40$ cm, sendo que o menor diâmetro medido de 4,22 cm, foi superior ao valor de 2 cm imposto pela restrição do tamanho da amostra (eq. 3.1).

TABELA 4.2 - Diâmetro e comprimento médios do pão francês de 50 g, obtidos durante o assamento.

tempo (min)	diâmetro médio (cm)	desvio padrão (cm)	comprimento médio (cm)	desvio padrão (cm)
0	4,56	0,34	11,20	1,48
1	5,06	0,41	11,24	0,93
2	6,04	0,01	10,67	0,61
3	4,93	0,66	11,32	0,42
4	5,78	0,25	11,04	0,05
5	5,16	0,46	11,51	1,19
6	5,58	0,42	11,44	0,01
7	5,40	0,52	12,05	0,72
8	5,67	0,04	11,64	0,36
9	5,71	0,60	11,97	0,27
10	5,24	0,96	12,65	1,68
11	5,39	0,62	11,71	0,52
12	5,54	0,37	12,02	0,28
13	5,33	0,27	12,73	0,66
14	5,69	0,01	12,77	1,26

Observando a Figura 4.1 os valores médios dos diâmetros obtidos em tempos pares e em tempos ímpares, nota-se que a abertura do forno na retirada do primeiro intervalo provocou uma perturbação maior no processo conduzido com retiradas em tempos ímpares. Isto ocorreu devido que nos primeiros instantes do assamento é realizada a vaporização provocando uma drástica expansão do volume. Essa expansão sofreu uma interrupção maior quando a abertura da porta do forno foi realizada no 1º minuto de assamento (ensaio do tipo B) em relação àquela sofrida no 2º minuto de assamento (ensaio do tipo A). Essas variações dos valores do diâmetro são minimizadas após 7 minutos de assamento, independente do tipo de ensaio, devido à maior resistência da massa pela formação da casca. Estas variações são comparáveis com a variação da temperatura do centro geométrico do pão durante o assamento.

FIGURA 4.1 – Diâmetro médio dos pães e perfil de temperatura no centro geométrico e na superfície do pão em função do tempo de assamento.

Observando a Figura 4.2 os valores médios dos comprimentos obtidos em tempos pares e tempos ímpares, nota-se que as variações não foram significativas, ou seja, a expansão do volume no sentido longitudinal não sofreu perturbações devido às aberturas do forno. O comprimento dos pães aumentou ligeiramente ao longo do assamento de um valor médio inicial de $11,20 \pm 1,48$ cm até um valor médio final de $12,77 \pm 1,26$ cm.

FIGURA 4.2 – Comprimento médio dos pães em função do tempo de assamento.

4.3 - MASSA E VOLUME DOS PÃES

A massa dos pães produzidos na 1ª fornada foi determinada. Os valores médios da massa medida de dois pães de acordo com o ensaio e com o tempo de assamento estão apresentados na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 – Variação da massa medida de dois pães de acordo com o ensaio e com o tempo de assamento.

tempo (min)	massa (g)												média	desvio padrão
	B	A	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B		
0	123,4	117,7	114,6	117,3	118,4	115,2	117,9	118	109,9	118,7	119,5	119,2	117,5	3,2
1	123,8			118,5			118,2	119,4		118,9		118	119,5	2,2
2		115,1	110,1		116,1	115,1			119,3		117,6		115,6	3,1
3	119,5			117,2			116,4	116,6		117		115,8	117,1	1,3
4		112,2	111,1		115,3	109,9			119,9		114,3		113,8	3,6
5	116,2			115,2			113,9	113,1		111,8		112,7	113,8	1,6
6		111,2	105,6		111,5	108,8			112,9		111,2		110,2	2,6
7	112			108,6			108,5	107,5		107,5		106,2	108,4	2,0
8		107,3	105,5		106,2	105,1			102,2		107,1		105,6	1,9
9	107,6			106,6			104,9	105		104,1		105	105,5	1,3
10		106,7	102,8		102,5	102,2			98,6		99,1		102,0	2,9
11	104,8			103,1			101,8	100,5		102,6		100,8	102,3	1,6
12		105,1	99,6		100,8	98,2			99,8		100,9		100,7	2,4
13	101,2			98,9			98,9	99,4		100,8		99	99,7	1,0
14		100,3	98,4		97,3	96,7			90,3		97,3		96,7	3,4

Conforme ilustra a Tabela 4.3, os pães apresentaram após 14 minutos de assamento, uma massa média de $48,4 \pm 1,7$ g, valor muito próximo ao padrão esperado de 50 g. KOWALSKI (2001) realizou um estudo com pães tipo francês de várias panificadoras da cidade de São Paulo e reportou um valor médio da massa dos pães tipo francês de $53,4 \pm 8,1$ g.

As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram o decréscimo do valor da massa durante o processo de assamento, em torno de 18 % do valor da massa inicial, devido à perda por evaporação.

FIGURA 4.3 - Variação dos valores médios da massa de dois pães tipo francês ao longo do tempo de assamento a temperatura do forno pré-ajustada em 200 °C (ensaios do tipo A - tempos pares).

FIGURA 4.4 - Variação dos valores médios da massa de dois pães tipo francês ao longo do tempo de assamento a temperatura do forno pré-ajustada em 200 °C (ensaios do tipo B - tempos ímpares).

A Tabela 4.4 apresenta a análise de variância aplicada nos valores da massa, indicando que tanto o tempo de assamento quanto a data do ensaio foram significativos estatisticamente, em um intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$).

TABELA 4.4 – Análise de variância aplicada nos valores da massa dos pães durante o assamento.

Fonte da variação	Soma dos	Graus de	Quadrado	Razão F	Valor de p
	Quadrados	Liberdade	Médio		
Ensaio	195,74	11	17,7946	4,09	0,0001
Tempo	4799,04	14	342,788	78,78	0,0000
Resíduo	304,568	70	4,35097		
Total (corrigido)	5501,44	95			

A Tabela 4.5 apresenta a análise de regressão de um modelo linear, indicando que o modelo explica 87,9 % da variabilidade da massa, denotando um bom ajuste do modelo.

TABELA 4.5 – Análise de regressão linear aplicada nos valores da massa dos pães durante o assamento.

Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	T estatística	Valor de p	
Constante	119,429	0,479299	249,174	0,0000	
Tempo	-1,57249	0,0601774	-26,131	0,0000	
<hr/>					
R ² = 0,878995	erro padrão da estimativa = 2,66119				
<hr/>					
Análise de variância					
<hr/>					
Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F	p
Modelo	4835,74	1	4835,74	682,83	0,0000
Resíduo	665,702	94	7,08193		
Total (corr.)	5501,44	95			

A equação do modelo ajustado é:

$$m = 119,429 - 1,572 \times t \quad (4.1)$$

onde:

m - massa (g)

t - tempo (min)

A Tabela 4.6 apresenta os valores do volume de dois pães medidos de acordo com o ensaio (A ou B).

TABELA 4.6 - Volume de dois pães, determinado a temperatura ambiente pelo método de deslocamento de sementes de painço, de acordo com ensaio A ou B, ao longo do assamento.

tempo		volume (cm ³)												média	desvio padrão
(min)	B	A	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B			
0	310	240	340	480	260	400	480	400	440	460	440	340	382	83	
1	320			360		180		200		300		380	290	83	
2			320		240		420		380		320		336	68	
3	360			440		300		300		430		300	355	66	
4		280	480		300		340		380		300		347	74	
5	340			420		500		360		450		340	402	66	
6		280	420		350		340		400		360		358	49	
7	360			400		300		340		500		370	378	68	
8		280	420		340		420		400		440		383	61	
9	430			440		500		360		550		420	450	66	
10		380	400		330		460		460		470		417	56	
11	440			380		480		380		530		360	428	67	
12		340	480		400		420		460		460		427	52	
13	460			330		520		410		580		400	450	90	
14		380	400		440		440		420		440		420	25	

Durante a fermentação, o volume dos pães praticamente dobrou. No assamento, segundo CALVEL (1987), o aumento do volume dos pães ocorre em duas etapas: no início o volume dos pães cresce devido à ação do fermento, e quando a temperatura do pão atinge cerca de 45 °C, o fermento perde sua atividade, quando então o aumento do volume ocorre devido à expansão do gás carbônico proveniente da ação do fermento nas etapas anteriores (fermentação e início do assamento).

Foi observado que os pães com menor tempo de assamento (1, 2 e 3 min), sofreram modificações na sua estrutura durante o resfriamento. O “murchamento” desses pães foi visível, principalmente naqueles retirados após 1 minuto de assamento. Este efeito pode ser melhor visualizado nas Figuras 4.5 e 4.6 e como era esperado, o volume médio dos pães aumentou com o aumento do tempo de assamento.

FIGURA 4.5 - Volume do pão francês durante o assamento, determinado pelo método de deslocamento de sementes de painço (ensaios do tipo A - tempos pares).

FIGURA 4.6 - Volume do pão francês durante o assamento, determinado pelo método de deslocamento de sementes de painço (ensaios do tipo B - tempos ímpares).

A Tabela 4.7 apresenta a análise de variância aplicada nos valores do volume do pão francês durante o assamento, indicando que o tempo de assamento e o ensaio influenciaram significativamente o volume em um intervalo de confiança de 95%.

TABELA 4.7 – Análise de variância aplicada nos valores do volume dos pães durante o assamento.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de p
ensaio	176534,0	11	16048,6	5,67	0,0000
Tempo	179158,0	14	12797,0	4,52	0,0000
Resíduo	195427,0	69	2832,28		
Total (corrigido)	543263,0	94			

4.4 - DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente foi calculada conforme a equação 4.2 a partir dos valores da massa e do volume dos pães. A Tabela 4.8 apresenta os valores encontrados da densidade aparente dos pães de acordo com o ensaio A ou B, ao longo do assamento.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \quad (4.2)$$

onde:

ρ_{ap} - densidade aparente (g/cm³)

m - massa (g)

V - volume (cm³)

TABELA 4.8 – Valores de densidade aparente do pão francês durante o tempo de assamento, calculados a partir dos valores obtidos de massa e volume.

tempo (min)	densidade aparente (g/cm ³)												média	desvio padrão
	B	A	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B		
0	0,398	0,490	0,337	0,244	0,455	0,295	0,240	0,295	0,250	0,258	0,272	0,351	0,324	0,085
1	0,387			0,329		0,657		0,597		0,396		0,311	0,446	0,145
2			0,344		0,484		0,274		0,314		0,368		0,357	0,079
3	0,332			0,266		0,388		0,389		0,272		0,386	0,339	0,058
4		0,200	0,231		0,384		0,323		0,316		0,381		0,306	0,076
5	0,342			0,274		0,228		0,314		0,248		0,331	0,290	0,047
6		0,199	0,251		0,319		0,320		0,282		0,309		0,280	0,048
7	0,311			0,272		0,362		0,316		0,215		0,287	0,294	0,049
8		0,192	0,251		0,312		0,250		0,256		0,243		0,251	0,038
9	0,250			0,242		0,210		0,292		0,189		0,250	0,239	0,036
10		0,281	0,257		0,311		0,222		0,214		0,211		0,249	0,041
11	0,238			0,271		0,212		0,264		0,194		0,280	0,243	0,035
12		0,309	0,208		0,252		0,234		0,217		0,219		0,240	0,037
13	0,220			0,300		0,190		0,242		0,174		0,248	0,229	0,045
14		0,264	0,246		0,221		0,220		0,215		0,221		0,231	0,019

KOWALSKI (2001) reportou o volume específico médio de pães tipo francês, produzidos em panificadoras da cidade de São Paulo, de $5,8 \pm 1,2 \text{ cm}^3/\text{g}$, resultando numa densidade aparente média de $0,17 \text{ g/cm}^3$. A diferença entre o valor obtido por KOWALSKI e a média obtida experimentalmente nesse trabalho de $0,231 \pm 0,019 \text{ g/cm}^3$ foi provavelmente a influência da interrupção do assamento para a retirada dos pães.

As Figuras 4.7 e 4.8 ilustram a diminuição da densidade aparente ao longo do processo de assamento. Nos primeiros minutos devido à vaporização na câmara do forno e a perturbação provocada no processo pela abertura da porta fica evidente pelo valor alto da densidade aparente (baixo volume, ver Figuras 4.5 e 4.6). O “murchamento” dos pães ocorreu devido à interrupção do processo antes da formação da casca. Esta perturbação é minimizada conforme o tempo de assamento aumenta, devido à formação da casca que promove maior resistência da superfície e a formação da estrutura esponjosa devido a gelatinização do amido e perda de água por evaporação. Este efeito também foi observado por BAKSHI; YOON (1984).

FIGURA 4.7 - Variação dos valores médios da densidade aparente do pão francês durante o tempo de assamento, calculada a partir dos valores obtidos de massa e volume (ensaio do tipo A - tempos pares).

FIGURA 4.8 - Variação dos valores médios da densidade aparente do pão francês durante o tempo de assamento, calculada a partir dos valores obtidos de massa e volume (ensaio do tipo B - tempos ímpares).

A Tabela 4.9 apresenta a análise de variância aplicada nos valores da densidade aparente do pão francês durante o assamento, indicando que o tempo de assamento foi um fator mais significativo do que o ensaio, embora as duas variáveis influenciaram significativamente a densidade aparente em um intervalo de confiança de 95%.

TABELA 4.9 – Análise de variância aplicada nos valores da densidade aparente dos pães durante o assamento.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de p
Ensaio	0,0893825	11	0,00812568	2,27	0,0198
Tempo	0,300629	14	0,0214735	6,00	0,0000
Resíduo	0,247003	69	0,00357976		
TOTAL (corr.)	0,641218	94			

4.5 - CONTEÚDO DE ÁGUA (BASE ÚMIDA)

A Tabela 4.10 apresenta os valores de conteúdo de água (base úmida) (CA) dos pães tipo francês, de acordo com o ensaio A ou B, ao longo do processo de assamento. Os valores foram calculados conforme descrito no método da AACC (1995) através da seguinte equação:

$$CA = 100 - \left[\left(\frac{m_{faf}}{m_{fai}} \right) \times \left(\frac{m_{mf}}{m_{mi}} \right) \times 100 \right] \quad (4.4)$$

onde:

CA - conteúdo de água dos pães, base úmida (%)

m_{faf} , m_{fai} - massa final e inicial da fatia do pão (g), submetida à secagem a temperatura ambiente

m_{mf} , m_{mi} - massa final e inicial da fatia moída do pão (g), submetida à secagem em estufa

O conteúdo de água (base úmida) médio do pão francês com 14 minutos de assamento foi de $30,85 \pm 1,68$ % valor muito próximo ao conteúdo de água de pães tipo francês ($29,4 \pm 1,9$ %) comercializados na cidade de São Paulo (KOWALSKI, 2001).

A Figura 4.9 mostra a diminuição linear dos valores médios do conteúdo de água (base úmida) em relação ao tempo de assamento, confirmando a perda esperada de água por evaporação durante o processo.

A Tabela 4.11 apresenta a análise de variância aplicada nos valores do conteúdo de água (base úmida), indicando que tanto o tempo de assamento quanto o ensaio influenciaram estatisticamente os resultados em um intervalo de confiança de 95%.

TABELA 4.10 - Variação do conteúdo de água do pão francês ao longo do tempo de assamento, determinado pelo método da AACC (1995).

tempo (min)	CA base úmida(%)												média	desvio padrão
	B	A	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B		
0	44,56	45,66	43,59	41,49	45,70	45,30	44,76	45,36	43,04	43,95	44,50	43,95	44,10	1,22
	45,05	45,39	42,58	41,79	45,05	45,29	42,72	44,41	42,51	43,98	43,65	43,98		
1	43,64			43,40			44,72			43,95		43,08	43,38	1,21
	43,94			40,01			43,08			43,03		44,34		
2		41,19	41,27		41,03		42,09		41,27		41,73		41,24	1,10
		42,93	38,67		41,14		42,19		41,53		39,84			
3	41,58			40,17			41,66			42,25		40,70	40,85	0,97
	41,85			39,73			39,72			42,01		39,92		
4		41,12	39,46		39,87		38,82		38,99		39,89		40,29	1,31
		42,86	39,53		41,45		40,02		39,21		42,19			
5	40,74			40,01			39,07			40,28		38,94	39,40	0,85
	40,13			37,57			39,10			39,84		39,07		
6		39,69	38,16		39,00		38,29		39,00		38,55		38,81	0,80
		40,06	37,59		39,54		37,72		38,50		39,61			
7	38,99			36,45			36,53			36,93		36,23	36,76	1,24
	39,21			35,60			36,57			37,39		35,48		

TABELA 4.10 (cont.) - Variação do conteúdo de água do pão francês ao longo do tempo de assamento, determinado pelo método da AACC (1995).

tempo (min)	CA base úmida(%)												média	desvio padrão
	B	A	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B		
8		37,55	35,73		36,04		36,89		34,73		35,98		36,14	1,67
		40,26	35,15		36,84		35,80		33,60		35,15			
9	36,49			36,06		34,15		35,31		34,20		34,20	35,30	0,84
	36,16			35,51		36,32		35,05		35,08		35,08		
10		38,31	34,10		35,06		32,41		32,61		34,39		34,68	2,08
		36,74	34,13		38,36		33,61		32,61		33,85			
11	34,26			32,77		34,11		33,35		33,13		33,13	33,52	0,51
	33,79			33,12		32,87		33,75		33,96		33,96		
12		36,77	31,39		32,67		32,46		31,31		32,49		33,14	1,93
		37,44	32,99		32,94		32,61		32,48		32,14			
13	32,04			31,42		32,43		31,82		30,23		30,23	31,62	1,21
	33,16			29,05		31,66		32,75		32,32		32,32		
14		34,18	30,85		30,52		30,45		29,17		30,59		30,85	1,68
		34,44	30,27		30,77		30,56		28,25		30,10

FIGURA 4.9 - Variação do conteúdo de água (base úmida) do pão francês durante o assamento, determinado pelo método da AACC (1995).

TABELA 4.11 – Análise de variância aplicada nos valores do conteúdo de água (base úmida) dos pães durante o assamento.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de p
Ensaio	162,264	11	14,7513	17,11	0,0000
Tempo	3428,1	14	244,864	283,94	0,0000
Resíduo	143,154	166	0,862372		
TOTAL (corr.)	3757,69	191			

A Tabela 4.12 apresenta a análise de regressão linear, indicando que o modelo explica 91,2 % da variabilidade do conteúdo de água (base úmida), denotando um bom ajuste do modelo.

TABELA 4.12 – Análise de regressão linear aplicada nos valores do conteúdo de água (base úmida) dos pães durante o assamento.

Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	T estatística	Valor de p	
Constante	43,9042	0,167608	261,946	0,0000	
Tempo	-0,93627	0,0210436	-44,4918	0,0000	
R ² = 0,912423 erro padrão da estimativa = 1,31607					
Análise de variância					
Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F	p
Modelo	3428,6	1	3428,6	1979,52	0,0000
Resíduo	329,087	190	1,73204		
Total (corr.)	3757,69	191			

A equação do modelo ajustado é:

$$CA = 43,9042 - 0,93627 \times t \quad (4.5)$$

onde:

CA - conteúdo de água (base úmida) (%)

t - tempo (min)

4.6 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA DOS PÃES

A determinação da condutividade térmica efetiva foi realizada pelo método da sonda linear que consiste na aquisição do aumento da temperatura durante o aquecimento da amostra provocado pela sonda. A Figura 4.10 ilustra, como exemplo, o aumento da temperatura causado pelo aquecimento da sonda, durante 1 minuto, a uma taxa de 4,5 W/m (Q), inserida em um pão francês após 2 minutos de assamento.

FIGURA 4.10 - Aumento da temperatura no centro geométrico do pão francês após 2 min de assamento, causado pelo aquecimento da sonda linear a uma taxa de 4,5 W/m.

O trecho linear obtido na Figura 4.10 originou o gráfico do aumento da temperatura pelo tempo de aquecimento da sonda (Figura 4.11), de cuja inclinação pode ser determinada a condutividade térmica, de acordo com a equação 2.14.

FIGURA 4.11 – Gráfico do aumento da temperatura pelo tempo de aquecimento da sonda inserida no centro geométrico do pão francês, a uma taxa de 4,5 W/m, após 2 minutos de assamento.

Para cada ensaio utilizando a sonda, valores da corrente e voltagem foram lidos do multímetro e da fonte de alimentação. A partir desses valores, aplicando as equações 3.3 e 3.4, os valores da resistência por unidade de comprimento do fio aquecedor e a taxa de calor por unidade de comprimento foram calculados ($R_{\Omega m}$ e Q).

Assim, para cada inclinação do trecho reto da curva do aumento da temperatura em função do logaritmo natural do tempo de aquecimento causado pela sonda linear, ilustrada na Figura 4.11 como exemplo, e dos respectivos valores de $R_{\Omega m}$ e Q obtidos das leituras de corrente e de voltagem, foi possível determinar a condutividade térmica dos pães tipo francês, em duplicata, retirados do forno conforme o ensaio A ou B, a diferentes tempos de assamento, conforme a equação:

$$k = \frac{Q}{4\pi} \left[\frac{\ln(t/t_0)}{T - T_0} \right] \quad (2.14)$$

Para o exemplo ilustrado na Figura 4.11, os valores da corrente e da voltagem lidos foram 0,99 A e 1,13 V, respectivamente. Os valores de $R_{\Omega m}$ e Q calculados foram 4,56 Ω/m e uma taxa de aquecimento de 4,47 W/m. Assim da inclinação da curva de 1,4577 °C, o valor de k obtido foi de 0,244 W/m °C, com o ensaio da sonda realizado à temperatura ambiente de 28 °C.

A Tabela 4.13 apresenta os valores obtidos de condutividade térmica efetiva do pão tipo francês de acordo com o ensaio A ou B, a diferentes tempos de assamento. A Figura 4.12 mostra os valores médios dos resultados para cada minuto de assamento.

O Anexo A apresenta todas as curvas do aumento da temperatura em função do tempo de aquecimento causado pela sonda linear nos 16 pães de cada ensaio A ou B, descritos como 1ª fornada no item 3.3.2 - manufatura dos pães. Como os pães foram retirados em duplicata em diferentes tempos de assamento, 226 curvas foram obtidas no total para a determinação da condutividade térmica efetiva.

O Anexo A também apresenta as curvas do aumento da temperatura em função do logaritmo do tempo de aquecimento causado pela sonda inserida em glicerina P.A. para sua calibração.

O alto desvio padrão dos valores de condutividade térmica, apresentados na Tabela 4.13, são provavelmente devido à medida da sonda linear ser local e pelo fato de que o pão apresenta regiões heterogêneas em sua estrutura com diferentes condutividades térmicas nas partes gasosa, úmida e sólida.

TABELA 4.13 - Valores da condutividade térmica efetiva do pão francês obtida com o método da sonda linear.

tempo (min)	k (W/m K)															média	desvio padrão
	A	A	B	B	B	A	A	B	A	B	A	B	A	B	A		
0	0,315	0,432	0,359		0,267		0,254	0,254	0,237	0,220	0,285	0,228	0,210	0,231	0,228	0,284	0,074
	0,377	0,408	0,356	0,458	0,316	0,344	0,316	0,211	0,214	0,239	0,306	0,209	0,215	0,223	0,233		
1			0,155		0,344		0,294		0,300		0,265		0,332		0,271	0,284	0,060
			0,197		0,245		0,399		0,284		0,299		0,308		0,291		
2	0,209	0,215				0,244		0,168		0,117		0,182		0,168		0,201	0,056
	0,276	0,234				0,327		0,168		0,163		0,198		0,141			
3			0,236	0,272	0,191		0,244		0,145		0,161		0,148		0,149	0,188	0,042
			0,187	0,260	0,189		0,183		0,172		0,179		0,142		0,153		
4	0,207	0,305				0,190		0,141		0,160		0,159		0,139		0,179	0,051
	0,171	0,240				0,229		0,153		0,112		0,167		0,139			
5			0,224		0,179		0,192		0,130		0,179		0,149		0,145	0,175	0,034
			0,185	0,252	0,207		0,172		0,163		0,134		0,159		0,153		
6	0,192	0,172				0,176		0,126		0,128		0,142		0,125		0,154	0,035
	0,192	0,149				0,231		0,125		0,107		0,163		0,131			
7			0,140	0,240	0,178		0,149		0,142		0,149		0,134		0,122	0,173	0,036
			0,222	0,237	0,165		0,184		0,163		0,189		0,184		0,165		

TABELA 4.13 (cont.) - Valores da condutividade térmica efetiva do pão francês obtida com o método da sonda linear.

tempo (min)	k (W/m K)															média	desvio padrão
	A	A	B	B	B	A	A	B	A	B	A	B	A	B	A		
8		0,159				0,163		0,126		0,106		0,144		0,121		0,144	0,035
		0,225				0,193		0,121		0,116		0,139		0,116			
9			0,171	0,203	0,166		0,150		0,147		0,131		0,135		0,126	0,163	0,027
			0,163	0,234	0,166		0,154		0,179		0,166		0,164		0,150		
10		0,162						0,121		0,102		0,136		0,134		0,136	0,021
		0,149				0,177		0,131		0,121		0,145		0,121			
11			0,152	0,247	0,161		0,132		0,119		0,138		0,122		0,128	0,147	0,034
			0,157	0,195	0,163		0,125		0,115		0,138		0,127		0,133		
12						0,157		0,108		0,118		0,135		0,110		0,123	0,017
								0,125		0,107		0,138		0,112			
13			0,157	0,208	0,149		0,139		0,112		0,146		0,127		0,111	0,144	0,029
			0,147	0,210	0,152		0,137		0,120		0,136		0,135		0,119		
14	0,192					0,184		0,117		0,108		0,127		0,108		0,136	0,038
						0,177		0,118		0,108		0,141		0,118

FIGURA 4.12 - Variação da condutividade térmica do pão francês durante o tempo de assamento, pelo método da sonda linear de aquecimento.

A Tabela 4.14 apresenta a análise de variância aplicada nos valores de condutividade térmica, indicando que tanto o tempo quanto o ensaio influenciaram estatisticamente os resultados em um intervalo de confiança de 95%.

TABELA 4.14 – Análise de variância aplicada nos valores de condutividade térmica dos pães durante o assamento.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de p
Ensaio	0,168619	11	0,015329	19,68	0,0000
Tempo	0,484335	14	0,0345953	44,42	0,0000
Resíduo	0,125378	161	0,000778746		
TOTAL (corr.)	0,788579	186			

A Tabela 4.15 apresenta a análise de regressão de um modelo polinomial para a condutividade térmica em função do conteúdo de água (base úmida) e da densidade aparente. O modelo explica 98,9 % da variabilidade da condutividade térmica.

A equação do modelo ajustado é:

$$\ln k = -0,134165 \times CA - 0,00205149 \times \rho_{ap} + 0,00248243 \times CA^2 + 2,295917 \times 10^{-6} \times \rho_{ap}^2 \quad (4.6)$$

$$28,25 \% \leq CA \leq 45,70 \%$$

$$0,174 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_{ap} \leq 0,657 \text{ g/cm}^3$$

onde:

k - condutividade térmica (W/m K)

CA - conteúdo de água (base úmida) (%)

ρ_{ap} - densidade aparente (g/cm^3)

A Figura 4.13 mostra a superfície de resposta do modelo da condutividade térmica em função do conteúdo de água (base úmida) e da densidade aparente.

TABELA 4.15 – Análise de regressão aplicada nos valores da condutividade térmica dos pães.

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	T estatística	Valor de p	
CA	-0,134165	0,00805	-16,6665	0,0000	
ρ	-0,00205149	0,000973412	-2,10752	0,0365	
CA ²	0,00248243	0,000117511	21,1252	0,0000	
ρ ²	0,00003373	0,0000118257	2,85225	0,0049	
R ² = 0,9895	erro padrão da estimativa = 0,189272				
Análise de variância					
Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F	p
Modelo	599,783	4	0,108715	78,63	0,0000
Resíduo	6,3408	177	0,0013826		
Total (corr.)	606,124	181			

Condutividade Térmica dos Pães tipo Francês

FIGURA 4.13 – Superfície de resposta do modelo da condutividade térmica do pão tipo francês em função do conteúdo de água (base úmida) e da densidade aparente.

4.7 – DIFUSIVIDADE TÉRMICA EFETIVA DOS PÃES

4.7.1 – Coeficiente de transferência de calor convectivo do forno

A Figura 4.14 ilustra, como exemplo, o perfil da temperatura obtido na 2^a fornada do centro geométrico e da superfície do cilindro de alumínio. Nota-se nessa figura que os perfis são paralelos, evidenciando a alta condutividade térmica do alumínio. O aumento brusco que ocorre no 1^o minuto do assamento foi devido à vaporização no forno.

FIGURA 4.14 - Perfis da temperatura do forno, do centro geométrico e da superfície do cilindro de alumínio, durante o assamento.

A partir das curvas dos perfis das temperaturas do centro e da superfície do cilindro de alumínio e da temperatura do forno, obtidos da 2ª fornada de cada ensaio, foi traçado o gráfico da temperatura adimensional (θ) em função do tempo de assamento, como ilustra a Figura 4.15, como exemplo, conforme a equação:

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \exp\left[\left(-\frac{h}{\rho \times c \times L}\right) \times t\right] \quad (2.29)$$

onde:

θ - temperatura adimensional

T, T_0, T_{∞} - temperatura, temperatura inicial e temperatura ambiente (K)

t - tempo (s)

L - dimensão característica (m)

ρ - densidade (kg/m^3)

c - calor específico (J/kg K)

FIGURA 4.15 - Temperatura adimensional do cilindro de alumínio (14 cm de comprimento e 3,5 cm de diâmetro) durante o tempo de assamento, no

forno pré-ajustado a 200 °C. onde: $\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}$

A região da curva anterior aos 5 minutos na Figura 4.15 é a parte da curva fortemente influenciada pela vaporização e não pôde ser utilizada nos cálculos do coeficiente de troca de calor (h). A Figura 4.16 destaca o intervalo de dados da Figura 4.15 utilizada no cálculo do exemplo:

- dados do cilindro de alumínio: $l = 14 \text{ cm}$

$$R = 1,75 \times 10^{-2} \text{ m (cilindro infinito } L = R)$$

- valores interpolados de PERRY (1973) para $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura média do cilindro de alumínio durante o assamento: $\rho = 2685 \text{ kg/m}^3$

$$c = 1014 \text{ J/kg K}$$

- inclinação da Figura 4.16: $\frac{\theta_2 - \theta_1}{\exp(t_2 - t_1)} = -0,001$

Assim, h foi calculado pela equação 2.29.

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \exp\left[\left(-\frac{h}{\rho \times c \times L}\right) \times t\right] \quad (2.29)$$

$$h = -(-0,001) \times (2685 \times 1014 \times 1,75 \times 10^{-2})$$

$$h = 47,6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

FIGURA 4.16 - Gráfico da temperatura adimensional em função do tempo, utilizado

para o cálculo do coeficiente de troca de calor (h). onde: $\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}$

A Tabela 4.16 mostra os valores obtidos para o coeficiente de troca de calor convectivo (h) nos ensaios em que a história da temperatura foi adquirida.

TABELA 4.16 - Valores do coeficiente de transferência de calor durante o assamento.

ensaio	h (W/m ² K)
1	52,41
2	47,65
3	42,88
4	28,59
5	38,12
6	28,59
média	40,02
desvio padrão	10,97

O intervalo de valores obtidos do coeficiente convectivo de troca térmica (28,59 a 52,41 W/m²K), determinado nos ensaios, ficou dentro da faixa esperada. O sistema de circulação de ar no forno (velocidade média de 5 m/s) garantiu a transferência de calor por convecção forçada. De acordo com ARPACI (1966) e INCROPERA (1996), a faixa do coeficiente de transferência de calor convectivo (h) que indica uma convecção livre para gases é de aproximadamente 2 W/m²K a 25 W/m²K e uma convecção forçada é de 25 W/m²K a 250 W/m²K.

Após o cálculo de h foi possível calcular o número de Biot para verificar a hipótese de que o valor de Biot estaria abaixo de 0,2.

$$Bi = \frac{h \times L}{k} \quad (2.28)$$

$$Bi = \frac{28,59 \times 1,75 \times 10^{-2}}{208} = 2,4 \times 10^{-3}$$

onde:

L - dimensão característica (para o cilindro infinito $L = R = 1,75 \times 10^{-2}$ m)

k - condutividade térmica do alumínio = 208 W/m K [interpolado de PERRY (1973) para 120 °C]

O número de Biot foi calculado com o menor valor de h obtido, e mesmo assim este foi menor que 0,2 indicando que a aplicação da equação 2.34 foi correta.

4.7.2 – Determinação da difusividade térmica do pão francês

Para o cálculo de L (dimensão característica) do pão foram utilizados o valor médio do volume durante o assamento ($388,2 \text{ cm}^3$) e a área calculada pelos valores médios do diâmetro ($5,40 \text{ cm}$) e do comprimento ($11,73 \text{ cm}$) da Figura 4.1.

Para o cálculo do número de Biot no caso do pão francês foram utilizados o maior e o menor valor de h , obtido no item anterior, e também foram utilizados o maior e o menor valor médio da condutividade térmica do pão francês obtido com a sonda linear. Os valores encontrados do número de Biot estão apresentados na Tabela 4.17.

Assim como no cilindro de alumínio, dois termopares registraram o perfil de temperatura do pão francês durante o tempo de assamento (Figura 4.17). Quando o pão é inserido no forno a uma temperatura de $200 \text{ }^\circ\text{C}$, podemos perceber que a diferença entre a temperatura da superfície e do centro do pão diminui atingindo um mínimo próximo aos 5 minutos, e diminui após o oitavo minuto de assamento. Isso ocorre porque a temperatura da superfície do pão atinge um faixa aproximadamente constante, e a temperatura do centro continua aumentando até atingir valores também aproximadamente constantes. Como a temperatura do forno ($200 \text{ }^\circ\text{C}$) é maior que a temperatura aproximadamente constante do pão, ainda existe troca de calor, entretanto, nesse intervalo de tempo em que as temperaturas praticamente não se alteram, ocorre uma troca de calor latente para a mudança de fase de uma fração da água contida no pão. Na Figura 4.17, também é possível notar a influência da vaporização no assamento, essa influência é representada pelo aumento brusco na temperatura da superfície, aproximadamente no primeiro minuto de assamento.

TABELA 4.17 - Número de Biot para o caso do assamento do pão francês.

k (W/m K)	h (W/m² K)	número de Biot
0,123	52,41	6,77
0,284	52,41	2,93
0,123	28,59	3,69
0,284	28,59	1,60

FIGURA 4.17 - Perfis de temperatura do forno e do pão francês durante o assamento.

A partir da Figura 4.17 foi traçado um gráfico da temperatura adimensional em função do tempo para o pão francês (Figura 4.18).

$$\theta = \frac{T_c - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \Big|_{\text{cilindro finito}} = 2,0396 \exp \left(- \left(\frac{\pi^2}{l^2} + \frac{2,4048^2}{R^2} \right) \alpha \times t \right) \quad (2.23)$$

onde:

T_c - temperatura no centro da amostra (K)

α - difusividade térmica do pão francês (m^2/s)

t - tempo (s)

R - raio do pão (m)

l - comprimento do pão (m)

FIGURA 4.18 - Gráfico da temperatura adimensional em função do tempo de

assamento para o pão francês. onde: $\theta = \frac{T_c - T_\infty}{T_0 - T_\infty}$

A região da curva acima dos 6 minutos na Figura 4.18 é a parte onde a temperatura – da superfície e do centro geométrico do pão ficam praticamente constantes e no primeiro minuto ocorre a influência da vaporização. Por isso, o intervalo de dados utilizados para o cálculo da difusividade térmica do pão francês foi reduzido conforme ilustra a Figura 4.19.

FIGURA 4.19 - Gráfico da temperatura adimensional em função do tempo, utilizado

para o cálculo difusividade térmica do pão francês. onde: $\theta = \frac{T_c - T_\infty}{T_0 - T_\infty}$

Como o comprimento médio do pão foi de 11,73 cm e o diâmetro médio foi de 5,40 cm, a razão L_{am}/D_{am} foi de 2,17 e portanto esse caso não pode ser simplificado para um caso unidimensional. Como o número de Biot variou de 1,60 a 6,77, dentro do intervalo de 0,2 a 40 do caso 3 no item 2.2.2.2 – Análise Matemática do Uso das Curvas de Penetração de Calor, a difusividade térmica efetiva do pão francês foi calculada para o caso bidimensional pela equação 2.23, da seguinte forma:

- dados do pão: $l = 11,73 \times 10^{-2} \text{ m}$
 $R = 2,70 \times 10^{-2} \text{ m}$
- inclinação da Figura 4.19: $\frac{\theta_2 - \theta_1}{\exp(t_2 - t_1)} = -0,0039$

pela equação 2.23:

$$\alpha = -0,0039 \times \left(- \left(\frac{\pi^2}{(11,73 \times 10^{-2})^2} + \frac{2,405^2}{(2,7 \times 10^{-2})^2} \right)^{-1} \right)$$

$$\alpha = 4,51 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

A Tabela 4.18 mostra os valores obtidos para α determinados nos ensaios da 2ª fornada.

O número de Fourier foi calculado para todos os valores de difusividade térmica obtidos para verificar se a equação 2.22 foi truncada corretamente. No cálculo do número de Fourier foram utilizados o valor médio do raio (2,7 cm) obtido e o tempo total do assamento. O número de Fourier variou de 0,34 a 1,16 e o número de Biot ficou entre 0,2 e 40, assim as restrições para a utilização da equação 2.23 foram satisfeitas.

TABELA 4.18 - Valores experimentais da difusividade térmica do pão francês, obtidos através das curvas de temperatura do pão durante o assamento.

ensaio	a (m ² /s)
1	2,081×10 ⁻⁷
2	4,392×10 ⁻⁷
3	7,051×10 ⁻⁷
4	4,508×10 ⁻⁷
5	3,121×10 ⁻⁷
6	4,623×10 ⁻⁷
7	3,930×10 ⁻⁷
8	4,046×10 ⁻⁷
9	3,236×10 ⁻⁷
média	4,110×10 ⁻⁷
desvio padrão	1,371×10 ⁻⁷

Comparando os valores experimentais da Tabela 4.18 com os modelos de Riedel (eq. 2.18) e Martens (eq. 2.19), percebemos que realmente esses modelos não se ajustam a alimentos porosos, como o pão. Os valores encontrados para o pão com os modelos de Riedel e Martens, respectivamente são $3,04 \times 10^{-6}$ e $2,25 \times 10^{-6}$ m²/s, com os dados médios de temperatura 87,48 °C e 37,3 % de conteúdo de água (base úmida) para o pão durante o assamento.

$$\alpha = 0,088 \times 10^{-6} + (\alpha_a - 0,088 \times 10^{-6}) \times CA \quad (2.18)$$

$$\alpha = [0,057363 \times CA + 0,000288 \times (T + 273)] \times 10^{-6} \quad (2.19)$$

onde:

α - difusividade térmica (m^2/s)

α_a - difusividade térmica da água (m^2/s)

CA - conteúdo de água (base úmida) (%)

T - temperatura ($^{\circ}C$)

4.8 – COMPARAÇÃO DOS VALORES EXPERIMENTAIS COM OS DADOS DA LITERATURA

A Tabela 4.19 apresenta propriedades termofísicas de produtos de panificação publicadas por alguns pesquisadores. Os valores experimentais de difusividade térmica efetiva estão de acordo com os esses dados encontrados na literatura. Ainda de acordo com a Tabela 4.19, os valores experimentais de densidade aparente variando de $0,324 \text{ g/cm}^3$ a $0,231 \text{ g/cm}^3$ durante o assamento parecem ser coerentes para o pão francês. Da mesma forma, a variação da condutividade térmica efetiva obtida de $0,284 \text{ W/m K}$ a $0,136 \text{ W/m K}$ também está dentro da faixa de valores esperada para o pão francês.

TABELA 4.19 – Propriedades termofísicas de produtos de panificação.

Produto	T (°C)	CA (%)	r (g/cm³)	k (W/m K)	a · 10⁻⁷ (m²/s)
Bolo ⁽¹⁾	-	41,5	0,300	0,121	1,44
Massa de pão de trigo ⁽¹⁾	28	42,0	0,623	0,414	2,30
Massa de pão de centeio ⁽¹⁾	-	45,9	0,820	0,600	2,44
	-	53,6	0,718	0,407	1,87
Massa de biscoito ⁽¹⁾	-	4,1	1,252	0,405	1,10
Biscoito fórmula da AACC ⁽²⁾	24,35	-	-	0,385±0,080	-
	40,35	-	-	0,394±0,092	-
	52,35	-	-	0,311±0,030	-
	63,75	-	-	0,305	-
Biscoito tipo “hard-sweet” ⁽²⁾	24,75	-	-	0,380±0,025	-
	32,95	-	-	0,401	-
	46,35	-	-	0,305±0,033	-
Miolo de pão ⁽¹⁾	18	41,8	0,402	0,298	2,32
	18	42,8	0,340	0,244	2,41
Miolo de pão ⁽³⁾	-	-	0,491	0,588 ^(a)	4,00
	-	-	0,283	0,423 ^(a)	5,00
	-	-	0,187	0,297 ^(a)	5,30
Crosta de pão ⁽¹⁾	120	0,0	0,300	0,066	1,50
Crosta de pão ⁽³⁾	-	-	0,716	0,352	2,60
	-	-	0,462	0,244 ^(a)	2,80
	-	-	0,258	0,180 ^(a)	3,70
Massa de bisnaga ⁽⁴⁾	-	-	-	0,386	-
Bisnaga c/ 1 min de assamento ⁽⁴⁾	-	-	-	0,190	-
Bisnaga c/ 5 min de assamento ⁽⁴⁾	-	-	-	0,103	-
Bisnaga c/ 10 min de assamento ⁽⁴⁾	-	-	-	0,091	-

TABELA 4.19 (cont.) – Propriedades termofísicas de produtos de panificação.

Produto	T (°C)	CA (%)	r (g/cm ³)	k (W/m K)	$\alpha \cdot 10^{-7}$ (m ² /s)
Pão de malte ⁽⁵⁾	34,4	0,241	-	-	1,17 ^(b)
Pão de malte ⁽⁵⁾	34,4	0,241	-	-	2,56 ^(c)
Pão de fôrma c/ 8 min de assamento ⁽⁶⁾	-	0,307	-	0,720	-
Pão de fôrma c/ 16 min de assamento ⁽⁶⁾	-	0,285	-	0,670	-
Pão de fôrma 32 min de assamento ⁽⁶⁾	-	0,264	-	0,640	-
<i>Massa de pão francês</i> ⁽⁷⁾	24 ^(d)	44,10	0,324	0,284	-
<i>Pão francês c/ 1 min de assamento</i> ⁽⁷⁾	24 ^(d)	43,38	0,446	0,284	-
<i>Pão francês c/ 5 min de assamento</i> ⁽⁷⁾	24 ^(d)	39,40	0,290	0,175	-
<i>Pão francês c/ 10 min de assamento</i> ⁽⁷⁾	24 ^(d)	34,68	0,249	0,136	-
<i>Pão francês assado (14 min)</i> ⁽⁷⁾	24 ^(d)	30,85	0,231	0,136	-
<i>Pão francês</i> ⁽⁷⁾	84 ^(e)	-	-	-	4,11 ^(f)

(1) RASK (1989) apud ZANONI et al. (1995)

(2) KULACKI; KENNEDY (1978)

(3) ZANONI et al. (1995): a) Calculado a partir da equação $k = \alpha \times \rho \times c$

(4) BAKSHI; YOON (1984)

(5) MAGEE; BRANSBURG (1995): b) método logarítmico; c) método da tangente.

(6) UNKLESBAY et al. (1981)

(7) QUEIROZ (2001): d) média da temperatura ambiente durante os dias dos ensaios (16,3 - 28,2°C); e) média da temperatura do centro geométrico do pão francês durante o assamento (32,1 - 97,0°C); f) método das curvas de penetração de calor.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu que propriedades termofísicas como condutividade térmica efetiva, densidade aparente e difusividade térmica efetiva fossem determinadas experimentalmente. Os dados obtidos neste trabalho serão úteis em análises de processos de transferência de calor e massa em produtos de panificação e em otimização de processos envolvendo o pão francês.

As determinações das propriedades foram realizadas sempre com o mínimo de modificações no processo de manufatura do pão. A mudança mais significativa executada foi interromper o assamento na primeira fornada para a retirada dos pães, uma vez que as propriedades termofísicas deveriam ser medidas a cada minuto do assamento. Assim o objetivo deste trabalho de determinar as propriedades termofísicas do pão francês através de métodos simples e rápidos e estudar suas variações durante o assamento foi atingido.

Os resultados, apresentados no Capítulo 4, estão bem condizentes com os valores encontrados na literatura para produtos de panificação. As análises de variância apresentadas no Capítulo 4 indicaram que o tempo de assamento e o ensaio influenciaram as propriedades estudadas do pão.

Como esperado houve perda da massa do pão por evaporação durante o assamento. A perda de massa foi de aproximadamente de 18 % e seguiu uma tendência

praticamente linear. Os pães apresentaram 30,85 % como conteúdo de água (base úmida) final.

As dimensões, diâmetro e comprimento, do pão aumentaram durante o assamento. Enquanto o comprimento aumentou de forma regular durante o assamento, o diâmetro aumentou irregularmente devido ao efeito da vaporização, evidenciando que a transferência de calor no assamento ocorreu preferencialmente na direção radial do pão. O aumento do diâmetro foi proporcionalmente mais pronunciado do que o do comprimento. Conseqüentemente, o aumento do volume do pão no assamento aconteceu em grande parte na direção do raio. O volume médio do pão aumentou de 382 cm³ para 420 cm³.

Em consequência da perda de massa e do aumento do volume, a densidade aparente do pão diminuiu durante o assamento. A variação dos valores médios foi de 0,324 g/cm³ para o pão sem assamento a 0,231 g/cm³ para o pão com 14 minutos de assamento.

O método da sonda linear foi adequado para a determinação da condutividade térmica do pão francês. A condutividade térmica do pão francês diminuiu durante o tempo de assamento, essa variação foi devido as variações das outras propriedades como conteúdo de água (base úmida) e densidade aparente. Por isso, um modelo correlacionando a condutividade térmica com o conteúdo de água (base úmida) e a densidade aparente foi proposto. Os valores médios da condutividade térmica efetiva do pão francês variou de 0,284 W/m K para o pão sem assamento até 0,136 W/m K para o pão com 14 minutos de assamento.

O método do uso das curvas de penetração de calor também foi adequado para a determinação da difusividade térmica. O valor do coeficiente de transferência de calor convectivo obtido foi um valor dentro do esperado, indicando a presença do mecanismo de convecção forçada. O valor desse coeficiente também assegurou, pelo cálculo do número de Biot, que as resistências interna e externa à transferência de calor no assamento deveriam ser levadas em consideração na análise das curvas de penetração de calor para o pão francês. A média da difusividade térmica efetiva do pão francês experimental foi $4,1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Como continuação desse trabalho, seria importante a investigação e a minimização das fontes de erros nos resultados que apresentaram altos desvios padrão.

A porosidade é uma outra propriedade do pão que se futuramente for estudada poderá elucidar a drástica mudança de comportamento da curva de condutividade térmica do pão em função do tempo de assamento após o primeiro minuto. Um modelo correlacionando a condutividade térmica do pão com o conteúdo de água (base úmida) e a porosidade talvez explique melhor o comportamento dessa variável.

ANEXO A – Gráficos tempo-temperatura da glicerina e do pão francês

As figuras apresentadas a seguir mostram o aumento da temperatura em função do tempo nos ensaios utilizando a sonda linear de aquecimento. A Figura A1 mostra o aumento de temperatura de amostras de glicerina P.A. utilizada para calibração da sonda. As Figuras A2 a A31 mostram os gráficos para as amostras de pão francês. Os dois pães retirados ao mesmo tempo de assamento estão classificadas como a ou b.

De acordo com a Figura A1, o valor de k foi de $0,272 \pm 0,013 \text{ W/m K}$, apresentando um erro em relação ao valor da literatura de 4,21 % ($k_{\text{glicerina}} = 0,284 \text{ W/m K}$ a 28°C interpolado de PERRY, 1973). O valor experimental dividido pelo valor da literatura resultou no fator de correção de 0,9579. Os valores experimentais da condutividade térmica apresentados no Capítulo 4 foram divididos por esse fator.

FIGURA A1 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de glicerina P.A. utilizada para calibração da sonda linear a uma potência de 4,8 W/m.

FIGURA A2 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 10 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 11/07/00.

FIGURA A3 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 6 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 11/07/00.

FIGURA A4 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,4 W/m, data 01/08/00.

FIGURA A5 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,4 W/m, data 01/08/00.

FIGURA A6 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 7,2 W/m, data 23/08/00.

FIGURA A7 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 7,2 W/m, data 23/08/00.

FIGURA A8 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 7,2 W/m, data 28/08/00.

FIGURA A9 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 7,2 W/m, data 28/08/00.

FIGURA A10 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 10 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,7 W/m, data 09/10/00.

FIGURA A11 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 10 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,7 W/m, data 09/10/00.

FIGURA A12 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,5 W/m, data 11/01/01.

FIGURA A13 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,5 W/m, data 11/01/01.

FIGURA A14 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 12/01/01.

FIGURA A15 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 12/01/01.

FIGURA A16 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,5 W/m, data 15/01/01.

FIGURA A17 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,5 W/m, data 15/01/01.

FIGURA A18 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,7 W/m, data 16/01/01.

FIGURA A19 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,7 W/m, data 16/01/01.

FIGURA A20 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,7 W/m, data 17/01/01.

FIGURA A21 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,7 W/m, data 17/01/01.

FIGURA A22 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (de 0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,2 W/m, data 18/01/01.

FIGURA A23 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,2 W/m, data 18/01/01.

FIGURA A24 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,1 W/m, data 19/01/01.

FIGURA A25 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,1 W/m, data 19/01/01.

FIGURA A26 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 22/01/01.

FIGURA A27 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 22/01/01.

FIGURA A28 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 23/01/01.

FIGURA A29 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 14 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 4,8 W/m, data 23/01/01.

FIGURA A30 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,0 W/m, data 24/01/01.

FIGURA A31 – Perfil de temperatura no centro geométrico de amostras de pão francês (0 a 13 minutos de assamento), utilizando a sonda linear - potência de 5,0 W/m, data 24/01/01.

ANEXO B – Gráficos tempo-temperatura adimensional do cilindro de alumínio e do pão francês

As figuras apresentadas a seguir mostram os gráficos da temperatura adimensional do cilindro de alumínio e do pão francês durante o assamento.

FIGURA B1 – Temperatura adimensional do cilindro de alumínio em função do tempo de

assamento. onde: $\theta = \frac{T_c - T_\infty}{T_0 - T_\infty}$

FIGURA B2 – Temperatura adimensional do pão francês em função do tempo de

assamento. onde: $\theta = \frac{T_c - T_\infty}{T_0 - T_\infty}$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. **Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables**. New York, Dover Publications, 1964.
- AMERICAN ASSOCIATION OF CEREAL CHEMISTS – AACC. **Aproved Methods of the AACC**. 9. ed. St. Paul, American Association of Cereal Chemists, 1995.
- ARPACI, V. S. **Conduction heat transfer**. Reading, Addison-Wesley, 1966.
- ASHRAE handbook: refrigeraiton. Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1994.
- BAGHE-KHANDAN, M. S.; CHOI, Y. ; OKOS, M. R. Improved line heat source thermal conductivity probe. **Journal of Food Science**, v. 46, p. 1430-1432, 1981.
- BAKSHI, A. S.; YOON, J. Thermophysical properties of bread during baking. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, v. 17, n. 2, p. 90-93, 1984.
- BENNETT, A. H.; CHACE JR., W. G.; CUBBEDGE, R. H. Estimating thermal conductivity of fruit and vegetable components – the fitch method. **ASHRAE Journal**, v. 4, p. 80-85, sep. 1962.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena**. New York, John Wiley, 1960.
- CALVEL, R. O bom pão: informação técnica. jan/fev 1984. [Tradução da palestra proferida no XV Congresso Brasileiro da Indústria da Panificação].
- CALVEL, R. **O pão francês e os produtos correlatos: tecnologia e prática da panificação**. Fortaleza, J. Macedo, 1987.
- CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. **Conduction of Heat in Solids**. London, Oxford University Press, 1959.
- CHRISTENSON, M. E., TONG, C. H.; LUND, D. B. Physical properties of baked products as functions of moisture and temperature. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 13, p. 201-207, 1989.
- DESHPANDE, S. D.; BAL, S.; OJHA, T. P. Bulk thermal conductivity and diffusivity of soybean. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 20, p. 177-189, 1996.
- DINCER, I. Determination of Thermal Diffusivities of Cylindrical Bodies Being Cooled. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 23, p. 713-720, 1996.
- DINCER, I.; YILDIZ, M. Modelling of thermal and moisture diffusions in cylindrically shaped sausages during frying. **Journal of Food Engineering**, v. 28, p. 35-43, 1996.

- DROUZAS, A. E.; SARAVACOS, G. D. Effective thermal conductivity of granular starch materials. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 6, p. 1795-1799, 1988.
- GAZETA MERCANTIL. **Indústria de massas, pães e bolos**. Gazeta Mercantil, São Paulo, 1995, 62 p. (Série Panorama Setorial).
- GOEDEKEN, D. L.; SHAH, K. K.; TONG, C. H. True thermal conductivity determination of moist porous food materials at elevated temperatures. **Journal of Food Science**, v. 63, n. 6, p. 1062-1066, 1998.
- GRATZEK, J. P.; TOLEDO, R. T. Solid food thermal conductivity determination at high temperatures. **Journal of Food Science**, v. 58, n. 4, p. 908-913, 1993.
- HOOVER, F. C.; LEPPER, F. R. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. **Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers**, v. 56, p. 309-322, 1950.
- HWANG, M. P.; HAYAKAWA, K. I. Bulk densities of cookies undergoing commercial baking process. **Journal of Food Science**, v. 45, p. 1400-1402, 1407, 1980.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 4 ed. New York, John Wiley, 1996.
- 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.
- KOWALSKI, M. B. **Análise do perfil de textura, volume específico e conteúdo de água dos pães tipo francês da cidade de São Paulo**. São Paulo, 2001. (Relatório I.C.)
- KULACKI, F. A.; KENNEDY, S. C. Measurement of the thermo-physical properties of common cookie dough. **Journal of Food Science**, v. 43, p. 380-384, 1978.
- LUIKOV, A. V. **Heat and mass transfer in capillary-porous bodies**. Oxford, Pergamon Press, 1966.
- MADRID, A.; CENZANO, J.; VICENTE, J. M. **Manual de Indústrias dos Alimentos**. São Paulo, Varela, 1996.
- MAGEE, T. R. A.; BRANSBURG, T. Measurement of thermal diffusivity of potato, malt bread and wheat flour. **Journal of Food Engineering**, v. 25, p. 223-323, 1995.
- 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, p. 209-225, 1996 (a).

- MURAKAMI, E. G.; SWEAT, V. E.; SASTRY, S. K.; KOLBE, E. Recommended design parameters for thermal conductivity probes for nonfrozen food materials. **Journal of Food Engineering**, v. 27, n. 2, p. 109-123, 1996 (b).
- NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **QuickStart guide**. Austin, Texas. 1999.
- NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **LabVIEW**: User Manual. Austin, Texas. 1998.
- NIX, G. H.; LOWERY, G. W.; VACHON, R. I.; TANGER, G. E. Direct determination of thermal diffusivity and conductivity with a refined line-source technique. In: AIAA THERMOPHYSICS SPECIALIST CONFERENCE, 2., New Orleans, 1967. **Proceedings**. New York, Academic Press, 1967. p. 865-878.
- PALETTA, F. C. **Termometria**. São Paulo, Cetecil, 1988.
- PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; NUNES, A. S. Determinação experimental da condutividade e difusividade de grãos em regime permanente. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 19, n. 2, p. 264-269, 1999.
- PARK, K. J.; MURR, F. E. X.; SALVADEGO, M. Construção de um sistema de medição da condutividade térmica pelo método da sonda. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 17, n. 1, p. 7-10, 1997.
- PERRY'S chemical engineer's handbook. 5 ed. Kogakusha, Mc-Graw-Hill, 1973.
- POLLEY, S. L.; SNYDER, O. P. ; KOTNOUR, P. A compilation of thermal properties of foods. **Food Technology**, v. 34 (11) p. 76, 1980.
- RAHMAN, S. **Food properties handbook**. New York, CRC Press, 1995.
- RAMASWAMY, H. S.; LO, K. V.; TUNG, M. A. Simplified equations for transient temperatures in conductive foods with convective heat transfer at the surface. **Journal of Food Science**, v. 47, p. 2042-2047, 1982.
- RAPUSAS, R. S. ; DRISCOLL, R. H. Thermophysical Properties of Fresh and Dried White Onion Slices. **Journal of Food Engineering**, v. 24, p. 149-164, 1995.
- REIDY, G. A.; RIPPEN, A. L. Methods for determining thermal conductivity in foods. **Transactions of the ASAE**, v. 14, p. 248-254, 1971.
- ROUILLÉ, J.; BAIL A. L.; COURCOUX, P. Influence of formulation and mixing conditions on breadmaking qualities of french frozen dough. **Journal of Food Engineering**, v. 43, p. 197-203, 2000.
- SALLAS-MELLADO, M.; CHANG, Y. K. Efeito do congelamento da massa de pão sobre as leveduras e a estrutura do glúten. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 33, n. 2, p. 194-206, 1999.

- SINGH, R. P. Thermal diffusivity in food processing. **Food Technology**, v. 36, n. 2, p. 87-91, 1982.
- SINGH, R. P. Heating and cooling processes for foods. In: HELDMAN, D. R.; LUND, D. B. **Handbook of food engineering**. New York, Marcel Dekker, 1992.
- SISSOM, L. E.; PITTS, D. R. **Fenômenos de transporte**. Rio de Janeiro, Guanabara, 1988.
- SWEAT, V. E.; HAUGH, C. G. A thermal conductivity probe for small food samples. **Transactions of the ASAE**, v. 17, p. 56-58, 1974.
- SWEAT, V. E. Thermal properties of foods. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering Properties of Foods**. New York, Marcel Dekker, 1986. p. 49-87.
- TÁO, S. A. **Organização numa mini-panificadora**. São Paulo, 1995. Monografia. (Trabalho de Formatura) Departamento de Engenharia de Produção, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- TAVMAN, S.; TAVMAN, I. H.; EVCIN, S. Measurement of thermal diffusivity of granular food materials. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 24, p. 945-953, 1997.
- TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L. ; YAMASHITA, F. Thermophysical Properties of Brazilian Orange Juice as Affected by Temperature and Water Content. **Journal of Food Engineering**, v. 38, p. 27-40, 1998
- TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Processing Engineering**. New York. Chapman & Hall, 1991.
- UNKLESBAY, N.; UNKLESBAY, K.; NAHAISI, M.; KRAUSE, G. Thermal conductivity of white bread during convective heat processing. **Journal of Food Science**, v. 47, p. 249-253, 1981.
- VOUDOURIS, N. ; HAYAKAWA, K. Probe Length and Filling Material Effects on Thermal Conductivity Determined by a Maximum Slope Data Reduction Method. **Journal of Food Science**, v. 60 (3), p. 456-460, 1995.
- WANG, N.; BRENNAN, J. G. Thermal conductivity of potato as a function of moisture content. **Journal of Food Engineering**, v. 17, p. 153-160, 1992.
- ZANONI, B.; PERI, C.; GIANOTTI, R. Determination of the thermal diffusivity of bread as a function of porosity. **Journal of Food Engineering**, v. 26, p. 497-510, 1995.

APÊNDICE I - Equações Diferenciais de Energia

Partindo da equação de conservação generalizada na forma diferencial (BIRD, 1960)

$$\frac{\partial(\rho\Psi)}{\partial t} + \vec{\nabla} \left(\rho \vec{v} \Psi \right) = \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_\phi + \dot{\sigma}_{v\phi} \quad (\text{I.1})$$

onde:

ρ - densidade

$\vec{v}$ - velocidade

$\vec{\nabla}$ - divergente quando multiplica um vetor e gradiente quando multiplica um escalar

$\dot{\sigma}_{v\phi}$ - termo de geração de calor, associado por exemplo a dissipação viscosa, efeito Joule, etc.

Definindo,

$$\psi = cT \quad \text{e} \quad \vec{j}_\phi = -k \vec{\nabla} T \quad (\text{eq. de condução ou "lei" de Fourier})$$

onde:

c - calor específico a pressão constante

T - temperatura

k - condutividade térmica

A equação I.1 torna-se

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} + \vec{\nabla} \left(\rho \vec{v} c T \right) = \vec{\nabla} \left(k \vec{\nabla} T \right) + \dot{\sigma}_{v\phi} \quad (\text{I.2})$$

expandindo os termos diferenciais

$$\rho \frac{\partial(cT)}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \vec{\nabla}(cT) + cT \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \left(\rho \vec{v} \right) \right] = \vec{\nabla} \left(k \vec{\nabla} T \right) + \dot{\sigma}_{v\phi} \quad (\text{I.3})$$

onde:

$$\left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \left(\rho \vec{v} \right) \right] = 0 \rightarrow \text{equação da continuidade} \quad (\text{I.4})$$

se c , k forem constantes

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = k \nabla^2 T + \dot{\sigma}_{v\phi} \quad (\text{I.5})$$

Definindo,

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad \text{e} \quad \dot{\gamma} = \frac{\dot{\sigma}_{v\phi}}{\rho c}$$

onde:

α - difusividade térmica

$\dot{\gamma}$ - termo de geração de calor

A equação I.5 fica da seguinte forma

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = \alpha \nabla^2 T + \dot{\gamma} \quad (\text{I.6})$$

Assim, a equação anterior para um sólido sem geração interna de calor, fica

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (\text{I.7})$$

Em coordenadas cartesianas (Fig. I.1):

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (\text{I.8})$$

Em coordenadas cilíndricas (Fig. I.2):

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (\text{I.9})$$

Assumindo fluxo de calor unidimensional, na direção z para a placa e r para o cilindro;

Em coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{I.10})$$

Em coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) \quad (\text{I.11})$$

com raio constante:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \quad (\text{I.12})$$

FIGURA I.1 – Representação dos eixos em coordenadas cartesianas.

FIGURA I.2 – Representação dos eixos em coordenadas cilíndricas.

APÊNDICE II - Descrição do Termopar

- Nomenclaturas: T – Adotado pela Norma ANSI (americana)
CC – Adotado pela Norma JIS (japonesa)
- Liga: (+) Cobre – (99,9%)
(-) Constantan – ligas de Cu-Ni compreendidos no intervalo entre Cu(50%) Ni(50%) e Cu(65%) Ni(35%). A composição mais utilizada para este tipo de termopar é de Cu(58%) Ni(42%).
- Identificação da polaridade: o positivo (cobre) é avermelhado.
- Características:
 - Faixa de utilização: -184 a 370 °C
 - f.e.m.** produzida: -5,333 a 19,027 mV
 - Potência termoeletrônica média: 5,14mV/100°C (para temperaturas positivas)
 - Pode ser utilizado em atmosferas a vácuo, inertes, oxidantes ou redutoras
 - Apresenta boa precisão na faixa de utilização, devido à grande homogeneidade do cobre.
 - Em temperaturas acima de 310°C o cobre começa a se oxidar e próximo de 400°C, oxida-se rapidamente.
 - Com certas precauções e devidamente aferido, pode ser utilizado até -262°C.
 - Aplicações: Criometria, Indústrias de Refrigeração, Pesquisas Agronômicas e Ambientais, Química e Petroquímica.

Limites de Erro

Os termopares são normalmente fornecidos na forma de pares de fios “casados”. Nessas condições, estes devem obedecer a certas normas pré-estabelecidas, por Normas Técnicas.

Entende-se por erro de um termopar, o máximo desvio que este pode apresentar em relação a uma padrão, que é adotado como “Padrão Absoluto”.

O erro do termopar pode ser expresso em graus de temperatura ou em porcentagem da temperatura medida.

TABELA II.1 – Limite de erros do termopar tipo T

Faixa de Temperatura (°C)	Limites de Erro	
	Padrão	Especial
0 a 350	± 1,0 °C ou ± 0,75%	±0,5 °C ou ± 0,4%
-200 a 0	± 1,0 °C ou ± 1,5%	-

Fonte: Paletta (1988)

Obs.: 1) Quando o limite de erro é expresso em porcentagem este se aplica à temperatura que está sendo medida.

2) Estes limites não incluem erros de instalações ou sistemas.

3) Junta de referência a 0°C.

Limites Máximos de Aplicação

Os termopares têm limites máximos para aplicações, que é função das características termoeletrica e física dos pares, portanto, o limite inferior de temperatura para os tipos “J”, “R”, e “S” é de 0°C e para o tipo “B” é de 800°C.

Os limites superiores dependem da bitola do fio utilizado na construção dos termopares. Na tabela abaixo, constam os limites superiores recomendados pela ANSI MC 96.1-1975, sendo estes aplicáveis para termopares protegidos em tubos de final fechado, para trabalho em regime contínuo, portanto, não são aplicáveis aos termopares de isolamento mineral.

Eventualmente, os termopares poderão ser utilizados em temperaturas superiores às recomendadas, porém a sua vida útil será reduzida e para reutilização do mesmo, deverá sofrer uma checagem para verificar se o erro apresentado não está acima dos limites recomendados ou desejáveis.

TABELA II.2 – Limites máximos para aplicação do termopar tipo T.

Bitola 8AWG (ϕ 3,26mm)	Bitola 14AWG (ϕ 1,63mm)	Bitola 20AWG (ϕ 0,81mm)	Bitola 24AWG (ϕ 0,51mm)
-	370°C	260°C	200°C

Fonte: Paletta (1988)

APÊNDICE III – Programa de Aquisição de Dados LabVIEW

O LabVIEW é um ambiente de programação que permite a instrumentação virtual para controle, aquisição, análise e apresentação de dados. A programação no LabVIEW é realizada por meio de uma interface gráfica que resulta num fácil e rápido desenvolvimento de uma aplicação apropriada (NATIONAL INSTRUMENTS, 1999; NATIONAL INSTRUMENTS, 1998).

Um programa em LabVIEW, consiste em dois painéis. O primeiro é o painel de controle, e o segundo é o painel de diagramas. O painel de controle (Fig. III.1) conterá botões, indicadores, gráficos, etc.

FIGURA III.1 - Painel de controle de um programa LabVIEW.

No painel de diagramas (Fig. III.2), cada um dos elementos do painel de controle possui uma representação simbólica. Nesse painel, o programa é escrito amarrando-se os ícones, e também existe a possibilidade de representar programas inteiros como ícones e utilizá-los como sub-rotinas para outros programas.