

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia de Alimentos

**“ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS
DURANTE O PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO
DE ATUM (*Katsuwonus pelamis*) EM BOLSA FLEXÍVEL”**

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por MARCELO CRISTIANINI aprovada pela Comissão Julgadora em 02 de março de 1998.

Campinas, 02 de março de 1998.

Por

MARCELO CRISTIANINI

(Engenheiro de Alimentos)



Profa. Dra. PILAR RODRIGUEZ DE MASSAGUER
Presidente da Banca

Orientadora: PILAR RODRIGUEZ DE MASSAGUER, PhD.

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do título de Doutor em Ciência de Alimentos, área de concentração em Microbiologia de Alimentos.

Campinas, SP
Janeiro, 1998.

637308

BANCA EXAMINADORA



Prof.^a. Dr.^a. Pilar Rodriguez de Massaguer

Orientadora
FEA-UNICAMP



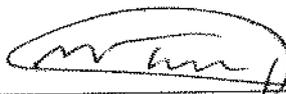
Prof. Dr. José Santo Goldoni

UNESP-Botucatu



Prof. Dr. Kim Jin Park

FEAGRI-UNICAMP



Prof. Dr. Satoshi Tobinaga

FEA-UNICAMP



Prof. Dr. Antônio Marsaioli Jr.

FEA-UNICAMP

Mr. Arthur Alves Teixeira, PhD.

Gainsville-EUA

Prof.^a Dr.^a Fernanda E. X. Murr

FEA-UNICAMP

*A todos aqueles que têm coragem
de perseguir um sonho.*

AGRADECIMENTOS

- À Prof^ª. Pilar pela confiança, orientação, apoio e incentivo no trabalho e na carreira.
- À minha família pela paciência, carinho e incentivo nas horas mais importantes.
- Aos colegas Homero, Flávio Schimdt, Cida, Lu(s), Ju, Augusto, Cris, Dna. Tereza e Fernando do Laboratório, pelo alto astral.
- Um agradecimento especial a Rosa pelo “oxigênio”, sem o qual a gente não sobrevive; ao Celso (baiano por excelência), Lúcio e Ricardo por transformarem duras horas de Allpax em grande amizade; e a Gisele pelo carinho e compreensão nos momentos difíceis da etapa final.
- Aos Professores do DTA, a Marlene, Cosme, Marçal e Henrique da secretaria pela compreensão e colaboração durante a realização do trabalho.
- Aos alunos de graduação pela compreensão e apoio.
- A Judite do Laboratório de Pescados pela ajuda com as análises.
- Ao Prof. Paul Singh pela orientação e pelo apoio em Davis.
- Ao Prof. Satoshi pela orientação e amizade.
- À Alcyon, na figura do Sr. Raulino, pelas amostras de atum.
- À Toyo Seikam Kaisha Ltd pela doação das bolsas.
- À CAPES e FAEP pelo apoio financeiro.
- Ao pessoal do Apoio ao usuário do Centro de Computação e do Cenapad da Unicamp pelo ajuda no procesamento.
- Aos engenheiros Fabio Amaral e Oswaldo da SMI pela ajuda com o ANSYS.
- À Deus pela oportunidade.

ÍNDICE

ABREVIATURAS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
OBJETIVOS	iv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Embalagens Flexíveis Termoprocessáveis	5
2.1.1 Introdução	5
2.1.2 O Processamento Térmico de Bolsas Flexíveis	9
2.1.3 O Uso de Bolsas Flexíveis no Processamento Térmico de Alimentos	13
2.2 Modelamento Matemático em Processos de Esterilização de Alimentos	15
2.2.1 Introdução	15
2.2.2 Propriedades Térmicas	20
2.2.2.1 Calor específico	20
2.2.2.2 Condutividade Térmica	21
2.2.3 Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor	22
2.2.4 O Método de Elementos Finitos	23
2.2.5 O Uso do Método de Elementos Finitos no Processamento de Alimentos	28
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 Caracterização do Produto	31
3.1.1 Determinação da Composição Centesimal do Atum	31
3.1.2 Determinação da Carga Microbiana Inicial	31
3.1.3 Determinação das Propriedades Físicas	32
3.1.3.1 Calor Específico (c_p)	32
3.1.3.2 Condutividade Térmica (k)	32
3.1.3.2.1 Método do DSC	33
3.1.3.2.2 Sonda Linear	35
3.1.3.3 Difusividade Térmica	37
3.1.3.4 Densidade	37
3.2 Embalagem	38
3.2.1 Otimização das Condições de Termossoldagem das Bolsas	38
3.2.1.1 Avaliação Visual da Área de Selagem	39
3.2.1.2 Determinação do Volume de Ar Residual	39
3.2.1.3 Determinação das Dimensões Características da Embalagem com o Produto	40
3.3 Equipamentos e Processos	40
3.3.1 Adaptação da Autoclave para Processamento de Bolsas	40
3.3.2 Calibração de Termopares	40
3.3.3 Distribuição de Temperaturas na Autoclave	42
3.3.4 Ensaios de Penetração de Calor nas Bolsas	45
3.3.5 Ensaio de Determinação do Perfil de Temperaturas no Interior das Bolsas	47
3.3.6 Coeficiente Convectivo Global de Transferência de calor (h)	48
3.3.7 Ensaio de Processamento Térmico e de Esterilidade Comercial do Produto	51
3.4 Modelamento Matemático do Perfil de Temperaturas na Bolsa	52
3.4.1 Elementos Finitos	52
3.4.2 Fórmulas Empíricas	56
3.4.3 Solução Analítica	57
3.5 Esterilização Média da Massa	58

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1	Caracterização do Produto	61
4.1.1	Composição Centesimal	61
4.1.2	Carga Microbiana Inicial	61
4.1.3	Propriedades Físicas do Produto	61
4.1.3.1	Calor Específico	61
4.1.3.2	Condutividade Térmica	64
4.1.3.3	Densidade	67
4.1.3.4	Difusividade Térmica	68
4.2	Embalagem	70
4.2.1	Avaliação Visual da Área de Soldagem	70
4.2.2	Determinação do Volume de Ar Residual	70
4.3	Equipamentos e Processos	71
4.3.1	Distribuição de Temperaturas na Autoclave	71
4.3.2	Penetração de Calor nas Bolsas	77
4.3.3	Determinação do Coeficiente Global de Transferência de Calor (h)	78
4.3.4	Ensaio de Processamento Térmico e Esterilidade Comercial	81
4.4	Modelamento Matemático do Perfil de Temperaturas na Bolsa	81
5	CONCLUSÕES	96
	BIBLIOGRAFIA	102
	ANEXOS	110

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 : Materiais típicos utilizados em bolsas flexíveis	7
Tabela 2 : Resumo dos Ensaios Realizados para Avaliar o Efeito do Espaçamento entre Blocos	44
Tabela 3 : Resumo dos Ensaios Realizados para Avaliar o Efeito da Temperatura de Processo	44
Tabela 4 : Parâmetros de Processo nos Ensaios de Penetração de Calor	47
Tabela 5 : Características dos Modelos Gerados para Análise por Elementos Finitos	54
Tabela 6 : Formulas Utilizadas no Modelo Empírico	57
Tabela 7 : Calor Específico de Atum em Salmoura	62
Tabela 8 : Condutividade Térmica de Atum em Salmoura pelo Método da Sonda Linear e pelo DSC (W/m °C)	65
Tabela 9 : Densidade de Atum em Salmoura (kg/m ³)	67
Tabela 10 : Difusividade Térmica de Atum em Salmoura	69
Tabela 11 : Volume de Ar Residual nas Bolsas Aplicando-se um Vácuo de 700mmHg.	71
Tabela 12 : Parâmetros Comparativos entre Arranjos de 4 Blocos (8cm) e 7 Blocos (4cm)	72
Tabela 13 : Comparativos entre Distribuição de Temperaturas na Autoclave Utilizando-se 115 °C e 121 °C para Posições FD, FM e C.	74
Tabela 14 : Comparativos entre Distribuição de Temperaturas na Autoclave Utilizando-se 115 °C e 121 °C para Posições FD, C e .FU.	75
Tabela 15 : Resultados do Ensaio I de Penetração de Calor nas Bolsas	78
Tabela 16 : Resultados do Ensaio II de Penetração de Calor nas Bolsas	78
Tabela 17 : Valores de h Obtidos para as Diferentes Fases do Processo	80
Tabela 18 : Valores Médios de h nas Fases de Subida, Aquecimento e Resfriamento	81
Tabela 19 : Condições de Processamento Durante Ensaio de Esterilidade Comercial.	81
Tabela 20 : Valores de Qui-quadrado (χ^2) e Coeficientes Angulares e de Correlação (R^2) Obtidos na Regressão Linear dos Valores de Temperaturas Experimentais Contra Aquelas Estimados pelos Modelos.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 : Representação Esquemática de um DSC Adaptado para Determinação de k e α .	33
Figura 2 : Representação Esquemática do Sistema Montado para Determinação de k e α Utilizando-se um DSC.	34
Figura 3 : Sonda Linear para Medida de Condutividade Térmica	36
Figura 4 : Representação Esquemática do Sistema de Aquisição de Dados para Determinação de k pelo Uso da Sonda Linear	36
Figura 5 : Recipiente para Contenção de Amostras	37
Figura 6 : Fluxograma do Sistema de Aquisição de Dados da Autoclave	41
Figura 7 : Detalhe do Arranjo de Quatro Blocos de Bandejas	43
Figura 8 : Detalhe do Arranjo de Sete blocos de Bandejas	43
Figura 9 : Disposição das Bolsas nas Bandejas e a Localização dos Termopares	44
Figura 10 : Esquema para Fixação de Termopares no Centro das Bolsas	46
Figura 11 : Tela do Programa para a Configuração da Autoclave para Processamento das Bolsas	47
Figura 12 : Esquema de Fixação de Termopares para o Estudo do Perfil de Temperaturas Dentro das Bolsas	48
Figura 13: Exemplo de uma Transformação Axial Obtida para um Perfil de Temperaturas no Centro da Bolsa	50
Figura 14: Seção Transversal da Bolsa com a Representação dos Nós e a Respectiva Malha de Elementos Utilizada no Modelo Bidimensional	53
Figura 15: Seção Utilizada no Modelo Tridimensional	53
Figura 16: Características dos Elementos Utilizados nos Modelos Bi e Tridimensional	54
Figura 17: Representação Esquemática da Aplicação do Coeficiente Global de Transferência de Calor e Temperatura do Meio de Aquecimento no Modelo de Elementos Finitos.	55
Figura 18: Perfil de Temperatura da Autoclave Comparado com o Utilizado no Modelo de Elementos Finitos	56
Figura 19 : Curva Característica do Calor Específico de Atum com 30% de Salmoura	62
Figura 20 : Regressão Linear do Calor específico x Umidade de Atum em Salmoura	63
Figura 21 : Curva de Aquecimento Típica Durante a Determinação da Condutividade Térmica	64
Figura 22 : Linearização da Curva de Aquecimento ($\ln(t) \times T$)	65
Figura 23 : Valores de Condutividade Térmica de Atum em Salmoura versus Umidade (%) pelo Método da Sonda Linear. A Curva Cheia Representa a Reta Obtida por Regressão Linear.	66
Figura 24: Regressão Linear dos Valores de Densidade de Atum em Salmoura versus Umidade.	68
Figura 25 : Difusividade Térmica de Atum em Salmoura. A Curva Cheia Representa a Reta Obtida pela Regressão linear.	69
Figura 26 : Médias de Temperaturas em Diferentes Posições no Arranjo de Quatro Blocos (espaçamento de 8cm).	73
Figura 27 : Médias das Temperaturas em Diferentes Posições no Arranjo de Sete Blocos (espaçamento de 4cm).	73
Figura 28 : Média de Temperaturas por Posição (Posições FD, FM e C)	76
Figura 29 : Média de Temperaturas por Posição (Posições FD, C e FU)	76
Figura 30 : Perfis de Temperaturas no Centro da Bolsa (Experimental x Modelos)	82
Figura 31: Regressão linear dos Valores Experimentais x Sol. Analítica (aquecimento)	85
Figura 32: Regressão linear dos Valores Experimentais x E. Finitos 2D (aquecimento)	85
Figura 33: Regressão linear dos Valores Experimentais x E. Finitos 3D (aquecimento)	86
Figura 34 : Regressão linear dos Valores Experimentais x Empírico (aquecimento)	86
Figura 35: Regressão linear dos Valores Experimentais x Sol. Analítica (resfriamento)	87
Figura 36 : Regressão linear dos Valores Experimentais x E. Finitos 2D (resfriamento)	88
Figura 37: Regressão linear dos Valores Experimentais x E. Finitos 3D (resfriamento)	88
Figura 38: Regressão linear dos Valores Experimentais x Empírico (resfriamento)	89
Figura 39 : Perfil de Temperaturas Estimadas pelo Modelo de Elementos Finitos 3D para as Posições Central (ES. centro), a 0,475mm (ES 0,475) e a 0,713 mm (ES. 0,713) do Centro, Contra as Observadas Experimentalmente (OB).	90
Figura 40: Perfil de Temperaturas na Bolsa no Tempo Zero.	90
Figura 41: Perfil de Temperaturas na Bolsa no Tempo 1000s.	91
Figura 42: Perfil de Temperaturas na Bolsa no Tempo 1350s.	91

<i>Figura 43: Perfil de Temperaturas na Bolsa no Final do Aquecimento (1740s).</i>	92
<i>Figura 44: Perfil de Temperaturas na Bolsa no Final do Resfriamento.</i>	92
<i>Figura 45: Perfil de Temperaturas na Bolsa no Final do Aquecimento Considerando a Temperatura do Meio Constante.</i>	93
<i>Figura 46 : Perfil de Temperaturas na Seção Transversal da Bolsa em Diferentes Tempos do Processo.</i>	94
<i>Figura 47: Perfil de Temperaturas na Seção Longitudinal da Bolsa em Diferentes Tempos de Processamento.</i>	95
<i>Figura 48: Temperatura Experimental no Centro de uma Bolsa x Temperatura Média da Massa</i>	97
<i>Figura 49 : Distribuição do Valor de Esterilização Média da Massa Durante o Processamento Térmico das Bolsas</i>	98
<i>Figura 50: Distribuição dos valores de F_p no final do tempo de aquecimento e o acumulado no final do resfriamento obtidos por elementos do modelo 3D de elementos finitos.</i>	99

ABREVIATURAS

- ρ : densidade (kg/m^3)
 α : difusividade térmica (m^2/s)
a: espessura da placa plana
 $Bi = ha/k$ (número de Biot)
 c_p : calor específico ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)
D: tempo em minutos a temperatura T necessário para reduzir uma população de microrganismos em 90%.
 D_r : tempo de redução decimal à temperatura de referência ($121,1^\circ\text{C}$).
EF2D : modelo de transferência de calor bidimensional por elementos finitos
EF3D : modelo de transferência de calor tridimensional por elementos finitos
EP : modelo empírico de transferência de calor
 $FO = \alpha t/a^2$ (número de Fourier)
 F_p : tempo de processo equivalente em minutos a uma determinada temperatura de referência para um valor selecionado de z.
 F_0 : letalidade em minutos a $121,1^\circ\text{C}$ ($z=10^\circ\text{C}$).
 F_m : valor de esterilização média da massa (min)
 f_c : inclinação da porção retilínea da curva de resfriamento (taxa de resfriamento, min)
 f_h : inclinação da porção retilínea da curva de aquecimento (taxa de aquecimento, min)
h: coeficiente convectivo global de transferência de calor ($\text{W/m}^2 \text{K}$)
 j_c : fator de atraso da curva de resfriamento
 j_h : fator de atraso da curva de aquecimento
k: condutividade térmica ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)
kPa : 10^3 Pascal
MIG: “Mercury-In-Glass”- termômetro de referência
N: número de microrganismos sobreviventes.
 N_0 : número inicial de microrganismos.
NMP: Número mais provável
PGC : programa utilizado para obtenção de curvas de calibração de termopares
RTD : “resistance temperature detector” – detetor de temperatura por resistência
SA: modelo de transferencia de calor utilizando soluções analíticas
T: temperatura ($^\circ\text{C}$)
t: tempo

T_B : temperatura do meio de aquecimento ($^{\circ}\text{C}$)

T_g : temperatura do alimento no início do resfriamento ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 : Temperatura inicial do produto ($^{\circ}\text{C}$)

T_w : temperatura do meio de resfriamento ($^{\circ}\text{C}$)

$U = (T - T_B) / (T_0 - T_B)$: adimensional de temperatura

UFC ; Unidades formadoras de colônias

W: umidade (% - Base Úmida)

x: distância do centro à superfície da placa plana

z : diferença de temperaturas que ocasiona uma mudança de 10 vezes no valor de D.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar a distribuição de temperaturas durante o processo de esterilização de atum em bolsa flexível. O produto foi constituído de atum em salmoura (500g de produto sendo 85% atum e 15% salmoura (p/p) a 2% de NaCl (p/v)), o qual foi acondicionado em bolsas flexíveis (Polipropileno/alumínio/Nailon/Poliéster -19x170x180mm) e esterilizados em uma autoclave a 121°C com água e sobrepressão de ar (20psi). O processo foi estabelecido para se obter um F_0 de 7,0 min. Foram determinadas experimentalmente a condutividade térmica (k) o calor específico (c_p), a difusividade térmica (α) e densidade (ρ) de atum em salmoura. Estas propriedades foram modeladas em função da umidade do produto tendo sido obtidas as seguintes relações: $c_p = 0,0239W + 1,7485$ (kJ/kg°C); $k = 0,0098W - 0,23$ (W/m°C), $\rho = 5,6315W + 626,37$ (Kg/m³) e $\alpha = 1,07 \times 10^{-7} W + 5,53 \times 10^{-8}$ (m²/s), onde W é a umidade do produto (%p/p base úmida). Quatro modelos matemáticos foram construídos para estimar a distribuição de temperaturas durante o processamento térmico do produto utilizando: 1) soluções analíticas (SA) para as equações de Fourier; 2) um modelo bidimensional de elementos finitos (EF2D) ; 3) um modelo tridimensional de elementos finitos (EF3D) e 4) um modelo empírico (EP). Os modelos de elementos finitos foram construídos através do ANSYS5.3 considerando a forma real da bolsa contendo o produto. Os modelos foram comparados estatisticamente considerando duas fases distintas: aquecimento e resfriamento. A comparação foi feita utilizando-se o teste de Qui-quadrado e através de uma regressão linear dos valores de temperaturas obtidas experimentalmente no centro das bolsas contra aquelas estimadas pelos modelos. Os valores de Qui-quadrado, inclinação e R^2 dos valores de temperaturas gerados por cada um dos modelos contra aqueles obtidos experimentalmente no período de aquecimento foram: EF3D (13.90, 0.9979, 0.9998); EF2D (19.96, 1.0030, 0.9997), SA (23.01, 1.0039, 0.9997) and EP (109.78, 0.9829, 0.9990). Analogamente, para a fase de resfriamento: EF3D (19.80, 0.9867, 0.9995); EF2D (20.23, 0.9856, 0.9996), SA (159.00, 0.9747, 0.9965) and EP (55.56, 1.0086, 0.9986). Um

valor de esterilização média da massa de 9,9min foi estimado utilizando o modelo EF3D quando o valor de F_p no ponto crítico foi 8,1min. A possibilidade da utilização de um perfil de temperaturas como condição de contorno dos meios de aquecimento e resfriamento, conferiu uma melhor performance aos modelos de elementos finitos principalmente na fase de resfriamento, que no tipo de autoclave utilizada (ALLPAX) é crítico devido a mistura da água de entrada do resfriamento com a água de aquecimento nos primeiros minutos da referida fase.

ABSTRACT

The main objective of this work was to evaluate the temperature distribution during thermal processing of tuna in retortable pouch. The product, consisting of grated pre-cooked tuna (steam cooked at 100°C for 1 hr) containing 85% tuna and 25% brine (2% NaCl w/v solution), was packed into institutional size retortable pouches (Polypropylene/Aluminium/ Nylon/Polyester 19x170x180mm) and processed in water at 121°C with an overriding air pressure of 20psi. The process was set to achieve a F_0 of 7.0 min. The thermal properties of the product were obtained experimentally by modelling specific heat (c_p), thermal conductivity (k), density (ρ) and thermal diffusivity (α) of a product consisting of grated pre-cooked tuna containing 0%, 10%, 20%, 25% and 30% of brine (2% NaCl w/v solution). The following formulae represent the linear regressions obtained using a least square method of tuna based on the percentage of moisture (W) of the product (wet basis) : $c_p = 0.0239W + 1.7485$ (kJ/kg°C); $k = 0.0098W - 0.23$ (W/m°C), $\rho = 5.6315W + 626.37$ (Kg/m³) and $\alpha = 1.07 \times 10^{-7} W + 5.53 \times 10^{-8}$ (m²/s). Two models using the finite element technique (2-dimensional (EF2D) and 3-dimensional EF3D) and one using an analytical solution (SA) to solve the 3-dimensional heat conduction equation for a finite plate were built. A fourth model (EP) was built using empirical solutions. The finite element models were built using the package ANSYS5.3 considering the actual pouch shape and retort temperature profile. Pouches were filled with tuna and processed in water (121°C, 20PSI). Nine runs were carried out and the temperature at the geometrical center was measured. Heating and cooling periods were analyzed separately. Chi-square and regression lines were obtained for each set of temperatures generated by the models against the experimental data. The Chi-square, slope and R^2 values of the predicted versus experimental data obtained for each model for the heating period were, respectively: EF3D (13.90, 0.9979, 0.9998); EF2D (19.96, 1.0030, 0.9997), SA (23.01, 1.0039, 0.9997) and EP (109.78, 0.9829, 0.9990). Analogously, for the cooling period: EF3D (19.80, 0.9867, 0.9995); EF2D (20.23, 0.9856, 0.9996), SA (159.00, 0.9747, 0.9965) and EP (55.56, 1.0086, 0.9986). The mass average sterilizing value of 9.9 min was estimated when a critical point sterilizing value was at 8.1min using the 3DFE model. Close agreement was found between the three models for the heating phase. Using actual retort temperature profiles made the finite element models more accurate than the analytical solution one, especially for the cooling phase in this immersion water process where there was a mixture of cool and hot water.

OBJETIVOS :

1. Estabelecer o processo térmico requerido para esterilização de atum ralado em bolsa flexível termoprocessável, por imersão em água com sobrepressão de ar.
2. Utilizar os parâmetros obtidos para estabelecer um modelo matemático para estimar a temperatura no interior das bolsas utilizando-se fórmulas empíricas.
3. Construir um modelo bidimensional e outro tridimensional através do software ANSYS, o qual utiliza o Método de Elementos Finitos para resolução das equações de Fourier para transferência de calor, para estudar a distribuição de temperaturas na bolsa durante o processamento.
4. Comparar os resultados obtidos pelos Métodos Analíticos com o Método Físico experimental de determinação de temperaturas no interior das bolsas.

1 INTRODUÇÃO

No princípio do século XIX, o economista Thomas Malthus propagava a sua doutrina baseada em leis naturais. Malthus elaborou sua teoria baseado no princípio no qual, sendo a área de cultivo de alimentos no planeta limitada, assim também seria a produção do mesmo. Desta forma, uma vez que alcançado tal limite, o constante crescimento da população levaria a humanidade aos limites da subsistência.

Muitas guerras e epidemias ocorreram desde que Malthus apresentou a sua teoria, o que fez por mudar o contexto da população mundial que pudera ser previsto naquela época. Muito embora a população do planeta não tenha atingido índices de crescimento em progressões geométricas, segundo PIGOTT (1994), no período entre 1991 e 2011 o número de consumidores será igual a metade de toda a população que já viveu no planeta até então e o consumo de alimentos será igual a todo aquele produzido nos últimos 10.000 anos.

O desenvolvimento da tecnologia tem proporcionado um melhor aproveitamento dos recursos naturais, mudando o panorama da produção mundial de alimentos. Ainda que grande parcela da população viva hoje no limite da subsistência, os motivos certamente são outros àqueles previstos por Malthus.

O certo, porém, é que com a necessidade de produzir cada vez mais alimentos, o homem necessitou também desenvolver técnicas para preservá-lo. Esta necessidade vem desde a pré-história quando o homem precisava armazenar alimentos para a entresafra. Os anseios do homem moderno são bem mais complexos e, certamente, o advento das guerras e as mudanças no modo de vida da sociedade foram fatores determinantes para o aparecimento de novas técnicas e materiais utilizados na preservação de alimentos.

No final deste século XX, o crescimento urbano e as mudanças de hábitos alimentares continuam influenciando as pesquisas por novos

processos de conservação de alimentos. No entanto, as viagens espaciais, o alto custo da energia e as exigências de um consumidor por alimentos de melhor qualidade e maior valor nutricional, têm levado cientistas a utilizarem tecnologias de ponta para oferecerem processos alternativos de preservação. Tecnologias como o uso de irradiação, microondas e aquecimento ôhmico (CRISTIANINI, 1988) têm proporcionado o aparecimento de produtos de excelente qualidade com maior valor agregado.

As técnicas de preservação de alimentos pela aplicação de calor em embalagens herméticas ganharam maior interesse após a publicação do primeiro livro sobre o assunto por Nicolas Appert em 1810 na França. O processo desenvolvido pelo autor que lhe mereceu um prêmio oferecido por Napoleão, consistia inicialmente em processar alimentos em garrafas de vidro fechadas com rolhas, em banho de água fervente. A partir disto, o processo então conhecido como apertização, mereceu o interesse da indústria e com ele a procura por novos métodos e materiais.

A primeira lata de folha de flandres surgiu na Inglaterra em 1823 e possuía um pequeno orifício no topo o qual era rosqueado com uma tampa. Em 1900 surgiu a primeira lata de três peças recravadas (LOPEZ, 1981). A indústria de latas ganhou grande impulso desde então e detêm hoje uma grande porção do mercado de alimentos. No entanto, embora as pesquisas com as bolsas flexíveis tenham-se iniciado na década de 50, a sua comercialização ganhou maior interesse no final dos anos 60 no Japão e nos EUA, e hoje já detêm um grande mercado dos alimentos processados (ANÔNIMO, 1980).

O processamento térmico de alimentos enlatados têm sido exaustivamente estudado (TEIXEIRA *et al.*, 1969a; TEIXEIRA *et al.*, 1969b; STUMBO, 1973; BALL & OLSON, 1957) e modelos matemáticos têm sido propostos para avaliação e otimização dos processos. Por outro lado, com o rápido crescimento do mercado de alimentos processados em bolsas flexíveis no Japão e EUA, alguns trabalhos científicos têm sido

publicados nos últimos anos (TANDON & BHOWMIK, 1986; NAVEH *et al.*, 1983; MCGINNIS, 1986).

Alguns trabalhos recentes indicam a possibilidade de produzir atum com excelentes qualidades em bolsas flexíveis (ADAMS *et al.*, 1983; OLIVEIRA *et al.*, 1988; OLIVEIRA *et al.*, 1986).

No Brasil, os estudos com bolsas flexíveis termoprocessáveis iniciaram-se em 1976 no Centro de Tecnologia de Embalagens de Alimentos (CETEA) do ITAL (ORTIZ, 1983). Vários trabalhos foram realizados analisando-se a qualidade e estabilidade de alguns alimentos esterilizados, tais como, feijão, ervilhas, carnes com legumes e atum em óleo comestível.

O CETEA desenvolveu também estudos para avaliação do desempenho de algumas bolsas de fabricação nacional, simulando-se situações de manuseio e transporte das mesmas (ORTIZ, 1983).

Alguns estudos também têm sido realizados na Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP, onde CARDELLI (1992) avaliou a adaptação de uma autoclave vertical para permitir o processamento de bolsas flexíveis utilizando-se água aquecida ou misturas de vapor/ar e também desenvolveram junto à Toga Industrias de Papéis de Arte José Tscherkassky S/A um laminado nacional para fabricação de bolsas flexíveis esterilizáveis.

A indústria brasileira de conservas de pescado fatura hoje cerca de 150 milhões de dólares por ano. O Brasil produziu em média, nos últimos anos, cerca de 45.000.000 de latas de atum (SANTOS, 1994)¹ mostrando que o comércio deste tipo de alimento possui um mercado promissor no país. Um estudo mais detalhado deste tipo de produto em uma embalagem e um processo alternativo se faz necessário para fornecer à indústria novos caminhos para a comercialização de seus produtos com

¹ SANTOS, W. L. J. (1994). Comunicação pessoal. Quaker Alimentos Ltda. São Gonçalo-RJ.

maior qualidade e menores custos, atingindo mercados como restaurantes, lanchonetes, pizzarias, hospitais, merenda escolar e rações militares.

Alguns poucos trabalhos têm sido publicados no Brasil mostrando ser possível obter atum de boa qualidade processado em bolsas flexíveis (OLIVEIRA *et al.*, 1988; OLIVEIRA *et al.*, 1986). Entretanto, até o presente momento nada foi publicado no intuito de avaliar os parâmetros de penetração e distribuição de calor no produto utilizando-se o Método de Elementos Finitos. Através deste método, torna-se possível avaliar a distribuição de calor por todo o volume do produto. A avaliação desta distribuição de temperaturas permite a otimização do processo de esterilização visando a melhoria da textura, cor e retenção de nutrientes, os quais são parâmetros essenciais de qualidade em uma conserva de atum.

Alguns fatores têm sido determinantes na escolha de bolsas flexíveis para o processamento de alimentos:

1. *Economia de energia*: o estreito perfil e a grande área exposta da embalagem promovem um rápido aquecimento no interior do produto com reduções de 30 a 40% de tempo de processo;
2. *Aumento de qualidade*: a redução do tempo de processamento resulta em melhor sabor, cor e menor perda de nutrientes;
3. *Economia de espaço*: bolsas vazias são mais fáceis de transportar e armazenar do que latas ou vidros, além de serem mais leves;
4. *Conveniência de uso*: as bolsas são fáceis de abrir e facilitam o reaquecimento para consumo;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Embalagens Flexíveis Termoprocessáveis

2.1.1 Introdução

Com o rápido crescimento do uso de plásticos nas últimas décadas, tornou-se inevitável a sua introdução na indústria de alimentos, seja na substituição de materiais existentes ou em aplicações totalmente novas.

Inicialmente, o uso das embalagens plásticas para alimentos eram restritas à sua característica de barreira, protegendo alimentos das ações do ambiente externo. No entanto, recentes desenvolvimentos de materiais tornaram possível o surgimento de embalagens flexíveis capazes de suportar altas temperaturas.

Uma embalagem flexível termoprocessável nada mais é que uma bolsa formada por um laminado (os mais comuns possuem uma camada externa de poliéster, uma intermediária de alumínio e uma interna de polipropileno) que após selada hermeticamente, permite que os alimentos nela contidos recebam um tratamento térmico, resultando em um produto de maior estabilidade. Trata-se do conhecido conceito de apertização. No entanto, quando comparado às latas e aos vidros, as bolsas oferecem algumas vantagens devido ao seu estreito perfil e sua natureza flexível.

Japão e EUA são hoje os principais detentores da tecnologia de processamento de embalagens flexíveis termoprocessáveis. Uma grande variedade de alimentos tem sido comercializadas com sucesso nestes países (ADAMS, 1983; ANÔNIMO, 1980, SNYDER & HENDERSON, 1989). Entre os principais estão os produtos pronto para consumo (“ready-to-eat” ou “boiling-in-bag”) a base de molhos, carnes, vegetais cozidos, arroz, pescados e outros (ANÔNIMO, 1980; ANÔNIMO, 1990).

Com o aumento dos custos de energia e distribuição, o uso das bolsas termoprocessáveis podem vir a ganhar cada vez mais espaço no

mercado de alimentos processados, substituindo latas convencionais, principalmente no caso das embalagens institucionais (SNYDER & HENDERSON, 1989).

No Japão, o comércio de alimentos processados em embalagens flexíveis teve início em 1969. O segmento mostrou um avanço rápido nas vendas chegando em 1978 a um montante de 50 bilhões de ienes (ANÔNIMO, 1980). A produção de alimentos em bolsas flexíveis cresceu de 30.000 tons em 1971 para 1.228.000 tons em 1988 (ANÔNIMO, 1980). Somente no período entre 1987 e 1988 houve um crescimento de 120.1% neste segmento do mercado. Produtos como arroz e curry mostraram aumentos de 294% e 124%, respectivamente, no mesmo período.

O desenvolvimento das bolsas termoprocessáveis começou nos EUA no começo dos anos 50. Grande parte do trabalho foi desenvolvido pela *U. S. Army Natick Development Center* devido ao interesse dos militares em desenvolver as chamadas rações de combate. Durante os anos 60 muitos avanços foram alcançados e grandes companhias americanas (*Reynolds Metal Co e Continental Can Co*), japonesas e européias demonstraram interesse no novo tipo de embalagem (LOPEZ, 1981). Novos processos e materiais têm sido desenvolvidos desde então com o intuito de adequar um maior número possível de alimentos às bolsas.

Somente em 1977 a USDA (U. S. Department of Agriculture) e o FDA (Food and Drug Administration) deram a aprovação final para *Reynolds Metal Co e Continental Can Co* iniciarem a comercialização dos novos materiais desenvolvidos para as bolsas. A maior fonte de preocupação dos órgãos americanos para a liberação da utilização das bolsas não eram os materiais utilizados, mas sim os adesivos utilizados na laminação (LOPEZ, 1981).

Vários laminados têm sido estudados para utilização em bolsas termoprocessáveis (LAMPI, 1977). A TABELA I apresenta uma lista de materiais mais utilizados neste tipo de embalagem.

Tabela 1 : Materiais típicos utilizados em bolsas flexíveis

Poliéster/Alumínio/Poliiolefina modificada
Poliéster/Alumínio/Copolímero etileno-Propileno
Poliamida/Polipropileno
Poliamida/Poliiolefina modificada
Poliamida/Polietileno de densidade média
Poliamida/Copolímero Polipropileno
Poliéster/Alumínio/Poliéster/Copolímero-Etileno-Propileno
Poliéster/Alumínio/Poliamida Orientada/Polipropileno

Fonte: Adaptado de LAMPI (1977).

Materiais designados à utilização em bolsas termoprocessáveis devem prover propriedades de barreira que permitam longos períodos de vida de prateleira, integridade de selagem, resistência mecânica e ainda suportar tratamentos térmicos rigorosos.

As camadas interna e externa das bolsas são laminadas com um sistema de deposição térmica de adesivo que uma vez prontas serão pouco afetadas pelo calor, frio, umidade ou óleos. O polipropileno modificado utilizado tem se mostrado compatível tanto com alimentos ácidos como com os de baixa acidez. A camada interna de poliolefina foi desenvolvida para proteger a flexibilidade considerando as mudanças de umidade, temperatura e condições de autoclavagem (LOPEZ, 1981).

Países europeus e Japão desenvolveram bolsas sem a camada intermediária de alumínio, constituídas apenas de poliéster/adesivo de poliuretano/polietileno modificada de alta densidade. Estes laminados tem sido utilizados para produtos com vida de prateleira entre 6 e 8 meses (LOPEZ, 1981).

Recentemente, um filme coberto com sílica tem sido utilizado na fabricação de bolsas termoprocessáveis (BRODY, 1994). A cobertura de sílica promove no laminado uma barreira ao oxigênio. O filme é transparente a energia de microondas, permitindo aos alimentos nele processados serem reaquecidos rapidamente para consumo.

LAMPI (1977) descreve uma lista de alguns requerimentos necessários para um laminado utilizado em bolsas termoprocessáveis:

1. Baixa permeabilidade a gases (oxigênio) - menor que 1cc/100polegada 24h atm;
2. Baixa taxa de transmissão de vapor de água (< 0.05 g/100 polegada 24 h)
3. Resistência à temperaturas entre 0°C a 121°C;
4. Baixas propriedades hidrofílicas;
5. Baixo custo do material de fabricação da embalagem;
6. Selagem térmica em uma ampla faixa de temperaturas;
7. Disponibilidade para uso em alimentos dentro das regulamentações do FDA;
8. Resistência a penetração de gorduras, óleos ou outros componentes dos alimentos;
9. Possuir estabilidade dimensional e ser quimicamente inerte, sem tendência a transmitir odor ou sabor ao alimento;
10. Resistência mecânica para suportar abuso de manuseio;
11. Promover atração a consumidores: transparência (opacidade), brilho e tato agradável;
12. Capacidade de ser utilizado em máquinas automáticas de fabricação e enchimento;
13. Boa resistência ao envelhecimento;
14. Boas qualidades de impressão.

Os materiais utilizados no processamento de alimentos considerados “comercialmente estéreis” devem se manter herméticos. Alguns trabalhos tem sido publicados para avaliar a permeabilidade de filmes e laminados à bactérias (LOPEZ, 1981). Os resultados mostram que os laminados normalmente utilizados para bolsas termoprocessáveis tem se

mostrado impenetráveis a microrganismos, a menos que algum tipo de fratura ocorra no filme.

2.1.2 O Processamento Térmico de Bolsas Flexíveis

Além das características de resistências mecânicas de qualquer filme flexível, os materiais designados para estas bolsas são diferenciados pela capacidade de suportar temperaturas de esterilização. As características inerentes dos filmes de poliéster, alumínio e polipropileno conferem ao laminado e conseqüentemente às bolsas, a possibilidade de serem processadas até 135°C.

As bolsas flexíveis têm sido processadas em autoclaves contínuas ou em bateladas (LOPEZ, 1981), desde que certas condições especiais sejam atendidas. Os meios de aquecimento utilizados no processamento são: vapor saturado, misturas vapor/ar e água com sobrepressão de ar (LOPEZ, 1981). A utilização de água com sobrepressão de ar tem ganho maior interesse, uma vez que proporciona um alto coeficiente de transferência de calor e oferece melhor controle de operação que as misturas vapor/ar.

Uma das propriedades singulares das bolsas termoprocessáveis é a sua flexibilidade. Esta característica, no entanto, lhe confere um motivo especial de atenção durante o processamento. Quando uma diferença de pressão ocorre no início do ciclo de resfriamento a expansão dos gases no interior da bolsa pode provocar explosão se não houver um controle rigoroso da sobrepressão de ar no interior da autoclave.

TUNG & RAMASWAMY (1986) estudaram as taxas de transferência de calor de misturas de vapor/ar no processamento de embalagens flexíveis. Foram estudadas a influência da temperatura (105, 110, 120 e 125°C), conteúdo de vapor na mistura (50, 65, 85 e 100%), fluxo (68 e 102 m³/h) e o ar residual na embalagem. Os autores concluíram que o conteúdo do vapor na mistura teve pouca influência na taxa de aquecimento dos blocos utilizados como simulantes. Concluiu-se, também,

que volumes de até 30ml de ar residual nas embalagens não tiveram influência na taxa de aquecimento para misturas contendo 65% de vapor a 115°C e 120°C , enquanto que, apenas 10ml já foram suficientes para causar diminuição em misturas contendo 85% de vapor.

WEINTRAUB *et al.* (1989) estudaram o efeito da taxa de aquecimento (f_h) no centro de embalagens flexíveis (16x23cm) contendo ar residual. Condições similares foram empregadas na autoclave utilizando-se mistura vapor/ar ou água com sobrepressão de ar como meios de aquecimento. Foram utilizadas três temperaturas (115, 120 e 125°C) e três níveis de sobrepressão de ar correspondente a misturas de vapor/ar contendo 65, 75 e 85% de vapor. Os autores concluíram que altas sobrepressões (maiores que 80 kPa) permitiram até 30 ml de ar residual nas embalagens sem que houvesse diminuição significativa nos valores de f_h . Por outro lado, para pressões inferiores a 40 kPa, volumes de até 5 ml tiveram grande influência na penetração de calor.

WHITAKER (1971) propôs uma fórmula matemática para calcular a expansão de bolsas contendo ar residual baseado nas Leis de Dalton para gases . A equação requer apenas o conhecimento das variáveis envolvidas (pressão e temperatura de operação da autoclave, volume de ar residual, etc.) e o uso de tabelas de vapor para determinar volumes específicos e pressões envolvidas.

CAMPBELL & RAMASWAMY (1992) estudaram as taxas de aquecimento (f_h), letalidade e localização do ponto frio de bolsas flexíveis (100 x 140 x 20 mm) contendo ar residual, durante o processamento com sobrepressão. Foram utilizadas duas temperaturas (121.1°C e 115.6°C) e dois níveis de sobrepressão, correspondendo a 65 e 75% de vapor, utilizando-se blocos de silicone como simulantes. Os autores demonstraram que, com exceção dos altos níveis de sobrepressão (121.1°C e 65% de vapor), volumes de até 20 ml de ar residual já foram suficientes para reduzir os valores de f_h , letalidade e deslocar o ponto frio do centro geométrico da embalagem. Com 60ml de ar residual o ponto de menor letalidade localizou-se perto da superfície do bloco.

LOPEZ (1981) apresenta uma série de vantagens e desvantagens atribuídas ao processamento térmico de alimentos em bolsas flexíveis. Entre as principais vantagens mencionam-se:

1. Vida de prateleira pelo menos igual à de alimentos processados em latas;
2. Menor espaço requerido para estocagem das bolsas mesmo em embalagens secundárias;
3. Redução do tempo de processo entre 30 e 40% resultando em economia de energia.
4. Redução à exposição a altas temperaturas resultando em melhoria de sabor, cor, odor e retenção de nutrientes;
5. Redução em volume e peso de estocagem das embalagens vazias;
6. As latas oferecem menor área de impressão para um mesmo peso de produto;
7. O custo individual da embalagem flexível é menor que as rígidas, no entanto, a necessidade de uma embalagem secundária pode vir a igualar os gastos;
8. A energia requerida para a produção das bolsas é menor que para as latas;
9. O problema de contaminação por metais pesados, por exemplo o chumbo, é eliminado. Problemas com corrosão deverão ser mínimos e a vida de prateleira poderá ser estendida.
10. Maior segurança aos consumidores para abertura, utilização e descarte de embalagens quando comparadas aos vidros e às latas;
11. O uso de embalagens cartonadas secundárias proporcionam melhor identificação do produto e a oportunidade de oferecer refeições combinadas, por exemplo, uma entrada e um acompanhamento;
12. O uso de bolsas permite um melhor controle de porcionamento, promovendo um marketing para refeições para solteiros e idosos;

13. Muitos produtos se acomodam fisicamente melhor às bolsas que às latas, como por exemplo, files de peixe, carne, etc.
14. Maior flexibilidade ao produtor para mudança de tamanhos;
15. Uma vez que as latas amassadas representam grande causa de desperdício em supermercados, os índices serão menores utilizando-se embalagens flexíveis.
16. A forma das bolsas permite maior área superficial por unidade de massa, permitindo uma melhor transferência de calor, reduzindo o tempo requerido de processo para se atingir esterilidade comercial.

Entre as principais desvantagens oferecidas pelas bolsas pode-se mencionar (LOPEZ, 1981):

1. Maior custo de investimento de equipamento para enchimento, selagem e processamento térmico;
2. As operações de envase de bolsas são mais complexas e mais lentas que latas e vidros;
3. O processamento térmico das bolsas é mais complexo;
4. A natureza flexível das bolsas torna mais difícil a detecção de vazamentos. As bolsas são mais facilmente perfuradas;
5. Estudos de marketing nos EUA mostram uma aceitação positiva das embalagens flexíveis, no entanto, muito investimento em propaganda é necessária para educação de consumidores e vendedores;

Embora a esterilização de alimentos em bolsas flexíveis necessite de cuidados especiais, os processos oferecem reduções de até 40% em consumo de energia (HEINTZ (1980).

2.1.3 O Uso de Bolsas Flexíveis no Processamento Térmico de Alimentos

O crescente interesse da indústria de alimentos pelo processamento em bolsas flexíveis pode ser atribuído principalmente a três fatores: conveniência, aumento significativo da qualidade dos alimentos processados e um potencial de redução de energia. Esta possibilidade de produzir alimentos de maior qualidade e com menores custos (STEFFE *et al.*, 1980, HEINTZ, 1980) tem levado cientistas a avaliar o processamento térmico de vários produtos alimentícios em bolsas flexíveis. Da mesma maneira, despertou-se interesse da indústria de equipamentos a qual tem adaptado ou até mesmo desenvolvido novos equipamentos para o processamento térmico das bolsas flexíveis.

ANÔNIMO (1980) apresenta linhas de produção completas para produção de carnes em molhos, presunto, hamburques de peixes e arroz em bolsas flexíveis. O autor apresenta ainda os materiais mais adequados para cada tipo de produto dependendo da estabilidade desejada.

No Japão, uma ampla variedade de alimentos a base de carne, pescados, vegetais e outros, vêm sendo processados em bolsas com sucesso (ANÔNIMO, 1990).

Dois tamanhos básicos de bolsas têm sido utilizadas no segmento alimentício: para as chamadas porções individuais utilizam-se bolsas de aproximadamente 125 x 175 mm, acomodando cerca de 150g de produto; as bolsas institucionais, com dimensões aproximadas de 200 x 250 mm, são mais empregadas para alimentos semi-prontos destinados a restaurantes industriais e comportam por volta de 1000g de produto.

ADAMS *et al.* (1983) estudaram o processamento de vários tipos de pescados (camarão, atum, filés magros e gordos, etc.) em bolsas flexíveis institucionais. Os autores encontraram uma maior retenção de aroma nesses produtos quando comparados ao processamento em latas. O atum foi processado em bolsas de 305 x 407 mm a 121°C, aplicando-se um valor de F_0 de 6 min. O processo mostrou-se promissor uma vez que proporcionou um produto de alta qualidade com uma redução considerável

no tempo de processo a 121°C (de 190min para 44min, quando comparado à latas 603x408). Foram encontrados valores de coeficiente de transferência de calor (h) menores que para latas e que os mesmos são de extrema importância quando na simulação de processos por computador.

EVANS *et al.* (?) avaliaram a potencialidade de esterilização de uma ampla variedade de alimentos em bolsas flexíveis. Foram processados alimentos sem líquido de preenchimento e com soluções de viscosidade diferentes (cenouras e ervilhas com salmoura, recheios de torta, carnes com molho, etc.). Avaliou-se: a) o efeito de diferentes métodos de fechamento das embalagens; b) diferentes formas de transferência de calor dentro do produto e c) o efeito da estocagem nos constituintes que pudessem normalmente demonstrar deterioração. Os autores concluíram que uma ampla variedade de alimentos, incluindo frutas, carnes e molhos, podem ser processados com sucesso em bolsas flexíveis. Vários aspectos do processamento, vantagens e desvantagens estão incluídos no trabalho.

O processamento de sardinha em óleo comestível foi estudado por OLIVEIRA *et al.* (1988). O produto foi processado em bolsas (150 x 200mm) imersas em água a 121.1°C com pressão mantida constante a 172,4 kPa. O F_0 entregue ao produto foi de 10 min. Foi encontrado um produto de boa qualidade mantendo a mesma por um período de estocagem de até 18 meses. Testes preliminares com consumidores mostraram boa aceitação do produto.

A qualidade de salmão processado em bolsas (176 x 250mm) e latas (307 x 200) foi comparada por DURANCE & COLLINS (1991). A mesma quantidade de produto foi processada em ambas as embalagens. As latas foram processadas a 120°C por 65 min. As bolsas foram processadas a 120°C com uma sobrepressão de ar de 176 kPa. O tempo de processo para as bolsas foi baseado na letalidade mínima aplicada às latas mais três desvios padrão. As análises sensoriais e instrumentais apontaram um produto mais firme, drenado e com melhor palatabilidade, quando processado em bolsas. Uma análise histológica revelou um produto com

estrutura mais compacta no salmão processado em bolsas, o que os autores atribuíram à sobrepressão de ar aplicada nas mesmas.

OLIVEIRA *et al.* (1986) estudaram o desempenho da embalagem e a qualidade organoléptica de atum (*Thunnus albacares*) processado em bolsas comparando-o com marcas tradicionais disponíveis no mercado brasileiro. Os autores concluíram que o atum processado em bolsas ao final de 12 meses de estocagem apresentou melhores qualidades organolépticas, em relação aos parâmetros estudados, e que a embalagem manteve condições adequadas de fechamento durante o período.

Um estudo da estabilidade de bonito-de-barriga-listrada (*Katsuwonus pelamis* L.) em óleo comestível processado em bolsas flexíveis (750 gr) e em latas metálicas (1,5 kg) foi realizado por OLIVEIRA *et al.* (1988). As bolsas (220 x 300mm) foram processadas a 121°C por 44,5min ($F_0=9.1\text{min}$) a uma pressão de 1,5 kgf/cm² ($\cong 147\text{kPa}$). O mesmo F_0 foi aplicado às latas, porém processadas a 119°C. Segundo os autores, o produto processado em bolsas apresentou qualidade organoléptica “boa” e estável por 360 dias, avaliada em termos de sabor, cor, textura e aparência geral. Entretanto o produto processado em latas apresentou-se como “bom” apenas após 15 dias e “aceitável” a partir de 30 dias. Os autores concluíram que a cor e a aparência geral foram os parâmetros de qualidade mais influenciados pelo tipo de embalagem, seguidos pelo sabor e textura.

2.2 Modelamento Matemático em Processos de Esterilização de Alimentos

2.2.1 Introdução

Entre as principais aplicações do modelamento matemático de transferência de calor em processamento de alimentos estão o desenho e a avaliação de processos destinados a produzir alimentos enlatados comercialmente estéreis. Estes processos consistem em aquecer os alimentos envasados em autoclaves pressurizadas a uma temperatura

constante por determinados períodos de tempo. Os processos são calculados com o intuito de garantirem a inativação bacteriana capaz de causar risco à saúde pública e assegurarem a probabilidade da deterioração a um mínimo determinado.

Associado a cada processo térmico para a inativação de microrganismos existirá sempre uma degradação de nutrientes ou de qualquer outro fator de qualidade. Assim, extremo cuidado é necessário no cálculo do tempo e da temperatura de processos afim de se evitar tanto subprocessamento como sobreprocessamento.. O modelo deve ser capaz de prever a temperatura do produto sujeito a variações de temperatura do processo, possibilitando assim o cálculo do valor de esterilização entregue ao mesmo.

Desde que Ball, em 1923, publicou seu primeiro modelo matemático clássico para avaliar processos de esterilização de alimentos, muitos outros procedimentos têm sido publicados (HAYAKAWA, 1978).

Estes procedimentos são geralmente classificados em dois grupos: Grupo I, os quais são baseados na avaliação da letalidade no ponto frio do produto, e Grupo II, baseados na avaliação da letalidade média da massa de todo o alimento contido na embalagem.

Os procedimentos do Grupo I são divididos em dois subgrupos: o Método Geral e o Método das Fórmulas. O Método Geral é geralmente mais preciso pois normalmente se utiliza-se de medidas experimentais para o cálculo do valor de esterilização (HAYAKAWA, 1978). Os Métodos das Fórmulas permitem prever tempo e temperatura do produto durante o processamento. Eles são normalmente subdivididos em dois grupos: os baseados em fórmulas empíricas e aqueles baseados em fórmulas teóricas.

Os métodos baseados em fórmulas empíricas são os mais largamente utilizados uma vez que são obtidos sem restrições quanto ao tipo de alimento, tamanho ou forma da embalagem. (HAYAKAWA, 1978). No entanto, as correlações obtidas através destes métodos para descreverem os processos utilizam-se de dados experimentais bem

definidos. Por isso são chamados empíricos ou semi-empíricos. Esta característica não lhes permitem muitas generalizações. Por outro lado, os métodos obtidos de fórmulas teóricas, ou soluções analíticas, baseiam-se em princípios físicos, permitindo soluções generalizadas para determinadas classes de problemas (PURI & ANANTHESWARAN, 1993).

HAYAKAWA (1978) apresenta uma revisão crítica dos procedimentos matemáticos utilizados em processos de esterilização de alimentos. O autor analisa em detalhes os principais procedimentos conforme surgiram ao longo dos anos, apresentando suas vantagens e desvantagens.

As soluções exatas para os problemas governados pelas Equações de Fourier para condução de calor são possíveis apenas para geometrias simples como placas planas, esferas, cilindros e condições de contorno simplificadas (NAVEH *et al.*, 1983).

Os métodos numéricos para resolução de equações diferenciais podem ser utilizados para resolver problemas mais realísticos e complexos de transferência de calor, como aqueles apresentados pela maioria dos processos de esterilização de alimentos. A idéia básica dos métodos numéricos é o processo de discretização, que reduz o problema físico, contínuo, com um número infinito de incógnitas, a um problema discreto com um número finito de incógnitas que pode ser resolvido por computador.

Atualmente, dois métodos numéricos têm sido utilizados para o tratamento de problemas de condução de calor em alimentos: o Método de Diferenças Finitas e o Método de Elementos Finitos. O primeiro é baseado na aproximação da derivada em um ponto (NAVEH *et al.*, 1983). Este método é limitado a casos onde o corpo estudado possui geometrias simples ou pode ser assumido como tal. Por outro lado, no Método de Elementos Finitos as equações dos elementos são obtidas pela minimização de funções válidas para cada sub-região do domínio (elementos). No Método dos elementos finitos, a discretização do domínio é feita através de

elementos que podem assumir formas geométricas diversas, permitindo uma melhor representação do problema. Os polinômios que interpolam a variação da função incógnita em cada elemento podem ser tanto lineares como de ordens superiores.. Isto permite uma maior flexibilidade ao método. Este método é considerado uma técnica poderosa para resolver equações numéricas, não sendo limitada por geometrias e ainda resolvendo problemas não lineares (NAVEH *et al.*, 1983).

O efeito do processamento térmico sobre a qualidade de alimentos enlatados têm tido grande interesse por parte dos processadores de alimentos. O interesse da literatura científica nos últimos anos reflete a importância econômica e nutricional deste tipo de processo.

O desenvolvimento de modelos matemáticos confiáveis que permitam a simulação de processos é fundamental para a otimização e controle dos mesmos (BANGA *et al.*, 1993).

Vários trabalhos têm sido publicados utilizando-se simulações numéricas para o processamento de alimentos condutivos enlatados (TEIXEIRA *et al.*, 1969a; TEIXEIRA *et al.*, 1969b; BANGA *et al.*, 1993, NAVEH *et al.*, 1983). Na maioria dos trabalhos publicados, os modelos propostos são testados contra alimentos homogêneos (purês, carnes, molhos, etc.) ou simulantes de alimentos (soluções de bentonita, carboximetilcelulose, etc.)

Com o desenvolvimento do uso de bolsas flexíveis no processamento de alimentos, o modelamento matemático do processo de esterilização neste tipo de embalagem deve crescer na medida em que novos equipamentos, materiais e sistemas são desenvolvidos.

Os modelos matemáticos desenvolvidos para embalagens metálicas rígidas ou vidros não são diretamente aplicados à forma pseudo retangular (tipo travesseiro) que apresentam as bolsas flexíveis. CASTILLO *et al.* (1980) desenvolveram um modelo resolvendo analiticamente as equações diferenciais, aproximando a forma de uma bolsa a um paralelepípedo. A validade do modelo foi avaliada

experimentalmente utilizando-se um simulante condutivo. O modelo foi efetivo para prever a temperatura do centro do produto no final do período de aquecimento (erros de 0 a 1,3%), e com maior erro no final do resfriamento (2,0 a 16,0%).

MANSON *et al.* (1974) desenvolveram uma solução numérica utilizando diferenças finitas aplicada a um alimento idealmente condutivo e em forma de pêra. O modelo foi comparado com valores experimentais e com soluções analíticas para cilindros finitos encontrando-se diferenças de 0,1% a um máximo de 0,2% entre os mesmos. Os autores demonstraram a sua utilidade como uma ferramenta para avaliar a destruição de microrganismos e retenção de nutrientes.

Um modelo tridimensional utilizando-se o Método de Diferenças Finitas foi proposto por MCGINNIS (1986) para análise transiente de calor em bolsas flexíveis contendo alimentos condutivos. Testes foram conduzidos para validar o modelo utilizando-se bolsas (176 x 127mm) com suspensões de bentonita (10%). O desvio médio absoluto encontrado entre o valor experimental e o predito foi inferior a 0,43°C para quatro simulações, enquanto que o maior erro absoluto encontrado foi de 1,03°C.

OHLSSON (1980) elaborou um modelo numérico para processamento térmico de bolsas flexíveis utilizando diferenças finitas. O autor aproximou a geometria da bolsa para uma placa plana infinita.

GOVARIS & SCHOLEFIELD (1988) desenvolveram um método bidimensional utilizando as equações de transferência de calor para o cálculo de F_0 em bolsas flexíveis. O modelo foi avaliado experimentalmente contra um Método Geral (Regra do Trapézio) e contra o Método de STUMBO (1973). Segundo os autores houve grande concordância entre os valores encontrados.

SPINAK & WILEY (1982) compararam o Método geral (Patashnik) contra as Fórmulas de Ball para avaliar o processamento térmico de bolsas flexíveis. Testes foram conduzidos utilizando-se um purê

e dois tipos de alimentos particulados. Os autores recomendam o uso das Fórmulas de Ball para o cálculo do processamento de bolsas flexíveis.

A maioria dos modelos matemáticos apresentados na literatura, até o presente momento, assumem formas retangulares ou de paralelepípedo para as bolsas, com algumas exceções. No entanto, durante o processamento em posição horizontal, as bolsas assumem uma forma que lhes é peculiar (travesseiro). As aproximações a formas mais convencionais (placa plana, bloco, etc.) podem levar a um processo térmico superestimado resultando em perdas de qualidade no produto final (TANDON & BHOWMIK, 1986).

O Método de Elementos Finitos possui a grande qualidade de poder ser aplicado a objetos de formas irregulares e alguns autores tem demonstrado sua aplicabilidade no processamento de alimentos (NAVEH *et al.* (1983); SASTRY *et al.* (1985); BANGA, *et al.* (1993).

2.2.2 Propriedades Térmicas

O cálculo de transferência de calor em alimentos requer o conhecimento das propriedades térmicas do mesmo, tais como calor específico, condutividade e difusividade térmicas. Com o constante aprimoramento das técnicas de cálculo e o auxílio de computadores, as soluções têm sido mais precisas e por isso requerem também dados mais precisos das propriedades térmicas dos alimentos.

O desenvolvimento de métodos mais precisos para a determinação das propriedades térmicas de alimentos tem ganho um papel cada vez mais importante no desenho de novos equipamentos e processos, bem como na simulação de processamento de alimentos.

2.2.2.1 Calor específico

Calor específico é a quantidade de calor recebida ou cedida por unidade de massa de um produto necessária para fazer variar sua

temperatura de uma unidade sem que haja mudança de estado físico (SINGH & HELDMAN, 1993).

Para uma mistura, como nos casos dos alimentos, o calor específico é influenciado pela composição do produto, umidade, temperatura e pressão. SINGH & HELDMAN (1993) apresentam fórmulas para o cálculo de calor específico de alimentos baseados na sua composição centesimal e na umidade.

Vários métodos têm sido apresentados para a determinação de calor específico em alimentos MOHSENIN (1980). A Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC) têm ganho interesse nos últimos anos e tem sido utilizada para determinação de calor específico de alimentos (ELANSARI & SINGH, 1995; VIJAYAN *et al.*, 1995). Nesta técnica, a diferença de energia fornecida a uma amostra e a uma substância de referência é determinada em função da temperatura enquanto ambas são submetidas a um programa controlado de temperatura (NASSU, 1994).

2.2.2.2 Condutividade Térmica

A condutividade térmica da maioria dos alimentos com alto teor de umidade está bem próxima à da água. SINGH & HELDMAN (1993) apresentam uma tabela com as condutividades térmicas de uma ampla variedade de alimentos.

Esta propriedade depende da composição, densidade, temperatura e umidade dos alimentos. SWEAT (1985) apresenta uma revisão de vários modelos matemáticos que têm sido utilizados para alguns sistemas de alimentos.

Diferentes técnicas têm sido empregadas para a determinação da condutividade térmica de alimentos. RIPPEN & REIDY (1971) apresentam uma revisão de vários métodos, entre eles um método transiente o qual utiliza uma sonda linear com fonte de calor. PEREZ-MARTIN *et al.* (1989) utilizaram esta técnica para determinação de condutividade térmica de

albacora (*Thunnus alalunga*). SWEAT *et al.* (1973) determinaram a condutividade térmica de carnes de frango com a mesma técnica.

BUHRI & SINGH (1993) serviram-se um método recém desenvolvido o qual utiliza um DSC. Os autores determinaram condutividade e difusividade térmica de uma grande variedade de alimentos com esta nova técnica.

2.2.3 Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor

Devido ao estreito perfil do laminado de fabricação da bolsa, o coeficiente convectivo de transferência de calor (h) durante o processamento térmico pode ser dito como “global”, uma vez que, em adição ao coeficiente de transferência de calor externo entre o meio de aquecimento e a bolsa, também está incluída a resistência entre o suporte das mesmas e a embalagem.

Enquanto coeficientes de transferência de calor entre a superfície de latas e meios de aquecimento com vapor saturado podem ser considerados perto de infinito, o processamento de bolsas flexíveis utilizando-se água sob pressão ou sob misturas vapor-ar como meios de aquecimento não podem assumir as mesmas características. LEBOWITZ & BHOWMIK (1989).

McGINNIS (1986) utilizou um modelo tridimensional (retangular) de transferência de calor como aproximação para uma bolsa e um método numérico para estimar os coeficientes convectivos de transferência de calor.

PETERSON & ADAMS (1983) utilizaram equações baseados na inclinação da curva de aquecimento (f_h) aplicados a uma placa plana infinita. Os autores variaram o meio de aquecimento e taxas de recirculação de água para verificar o efeito nos coeficientes de transferência de calor.

LEBOWITZ & BHOWMIK (1989) determinaram o coeficiente de transferência de calor durante o processamento de bolsas por um método de otimização.

2.2.4 O Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos surgiu no início dos anos 50 na indústria aeroespacial como um método numérico para resolução de equações diferenciais da física e engenharia. O conceito fundamental do método é baseado no fato de que qualquer 'quantidade contínua', como por exemplo temperatura ou pressão, pode ser aproximada por um modelo discreto composto de uma série de funções contínuas definidas em um número finito de sub-domínios (SEGERLIND, 1976).

A construção do modelo é feita como segue:

1. Um número discreto de pontos no domínio (área ou volume do corpo a ser estudado) são identificados. Estes pontos são chamados de pontos nodais ou simplesmente nós.
2. O valor da quantidade contínua em cada nó é denotada como sendo a variável a qual deve ser determinada.
3. O domínio é dividido em um número finito de sub-domínios chamados de elementos. Estes elementos são conectados através dos nós formando uma malha a qual se aproxima da forma do domínio.
4. A quantidade contínua é aproximada em cada elemento por um polinômio (ou funções de aproximação) o qual é definido utilizando-se o valor nodal da própria quantidade contínua. Um polinômio diferente é definido para cada elemento, selecionado de tal maneira a manter a continuidade nas fronteiras dos mesmos.

Uma vez construído o modelo e definidas as equações que governam, por exemplo, a transferência de calor no domínio, as incógnitas

passam a ser os valores nodais. Resolvendo-se, então, as equações de transferência de calor, geralmente representadas como equações de matrizes, os valores nodais passam a ser conhecidos. Uma vez conhecidos os valores nodais, os polinômios definem os valores de temperatura em cada elemento.

A equação diferencial parcial que governa a condução de calor em um sólido ortotrópico sem geração interna de calor é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2.4.1)$$

onde:

T = temperatura;

k_x , k_y e k_z são condutividades térmicas do material nas direções x , y e z ;

ρ é a densidade do material;

c_p é o calor específico do material;

t é o tempo.

Uma vez que a equação diferencial (2.2.4.1) é de segunda ordem, pelo menos duas condições de contorno devem ser especificadas. As possíveis condições de contorno são:

- **caso a)** ausência de resistência ao transporte de calor na superfície (S_1) expressa como:

$$T(x, y, z, t) = T_B \quad \text{para } t > 0 \text{ em } S_1 \quad (2.2.4.2)$$

onde S_1 é a superfície onde o valor de temperatura é especificado como $T_B(t)$;

- **caso b)** resistência ao transporte de calor na superfície S_2 :

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z + h(T - T_B) = 0 \quad (2.2.4.3)$$

para $t > 0$ em S_2

onde S_2 é a superfície na qual a troca de calor por convecção $h(T - T_B)$ é especificado;

- **caso c)** o fluxo de calor q_n é especificado na superfície S_3 :

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z + q_n = 0 \quad (2.2.4.4)$$

para $t > 0$ em S_3

Nas equações 2.2.4.2 a 2.2.4.4 tem-se:

h é o coeficiente convectivo ;

q_n é o fluxo de calor na superfície;

T é a temperatura a ser determinada;

l_x , l_y e l_z são os cossenos diretores da normal.

Uma vez que, para processo em questão, o caso (c) acima citado não ocorre, apenas as condições de contorno (2.2.4.2) e (2.2.4.3) serão consideradas.

A equação diferencial apresentada em (2.2.4.1) é de primeira ordem no tempo e portanto requer uma condição inicial.

Assim:

$$T(x, y, z, t = 0) = \overline{T_0}(x, y, z) \quad \text{em } V \quad (2.2.4.5)$$

onde V representa o domínio (ou volume) do sólido e $\overline{T_0}$ representa a distribuição de temperatura inicial especificada no tempo zero.

Encontrar a distribuição de temperatura no sólido significa resolver a equação (2.2.4.1) sujeita às condições de contorno de (2.2.4.2) ou (2.2.4.3) e a condição inicial dada em (2.2.4.5).

A distribuição de temperatura em um sólido pode ser obtida pela minimização de uma integral chamada de funcional (quantidade escalar cujo valor depende de funções desconhecidas). Para materiais com as condutividades térmicas, densidade e calor específico constantes, o funcional I equivalente à equação (2.2.4.1) sujeita às condições de contorno descritas anteriormente é:

$$I = \frac{1}{2} \iiint_V \left[k_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + k_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \right) T \right] dV + \frac{1}{2} \iint_{S_2} h (T - T_B)^2 dS_2 \quad (2.2.4.6)$$

A equação (2.2.4.6) tem a propriedade que a função $T=T(x,y,z,t)$ a qual faz I ser mínima, deve satisfazer também a equação (2.2.4.1) com as condições de contorno especificadas. Assim, a minimização da equação (2.2.4.6) é equivalente a resolver as equações (2.2.4.1) a (2.2.4.5).

A variação de temperatura em cada elemento pode ser escrita como segue (RAO, 1989):

$$T^{(e)}(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \vec{T}^{(e)} \quad (2.2.4.7)$$

onde:

$$[N(x, y, z, t)] = [N_1(x, y, z) \quad N_2(x, y, z) \quad \dots \quad N_p(x, y, z)]$$

$$\vec{T}^{(e)} = \begin{Bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ T_p(t) \end{Bmatrix}^{(e)}$$

onde $T_i(t)$ denota a temperatura do nó i e $N_i(x,y,z)$ o polinômio de interpolação correspondente ao nó i do elemento e com p nós.

As equações de condução dos elementos são obtidas minimizando o funcional expresso em (2.2.4.6) utilizando as equações de temperatura nos elementos. Uma vez que as equações de temperatura são válidas para cada elemento, o funcional tem que ser separado em n integrais, cada uma válida a cada elemento.

Uma discussão completa do processo de minimização relacionada a problemas transientes de transferência de calor pode ser encontrada em RAO (1989), e não será discutida aqui. O resultado deste processo é um grupo de integrais as quais podem ser resolvidas uma vez que as equações dos elementos (2.2.4.7), são especificadas. Estas integrais geram o que são normalmente referidas como equações dos elementos, cuja forma matricial pode ser escrita como:

$$[C] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} + [K] \{T\} - \{P\} = 0 \quad (2.2.4.8)$$

onde, $[C]$ e $[K]$ são matrizes quadradas dos coeficientes (calor específico e condutividades térmicas do material), $\{P\}$ é um vetor coluna dos valores conhecidos de temperatura e $\{T\}$ é um vetor coluna das temperaturas desconhecidas.

O conceito do método de elementos finitos pode ser aplicado a geometrias unidimensionais, bi-dimensionais ou tridimensionais. Os elementos são tanto triangulares ou quadrangulares. As funções nestes elementos se tornam superfícies planas ou curvas.

As principais vantagens do Método de Elementos Finitos são:

- o método pode ser aplicado a corpos compostos de vários materiais uma vez que as propriedades de cada elemento podem ser variadas;
- pode ser aplicado a corpos de superfícies irregulares, tanto pela aproximação do contorno por segmentos de linhas como empregando elementos com superfícies curvas;
- o tamanho dos elementos pode ser variado. Isto permite o uso de malhas mais finas em regiões onde ocorram gradientes mais ou menos elevados.
- superfícies descontínuas podem ser facilmente resolvidas;
- o método é bastante adequado para problemas não lineares;
- combinações de condições de contorno variadas são facilmente manuseadas (SINGH & SEGERLIND, 1974; PURI & ANAWTHESWARAN, 1993).

Como desvantagens, PURI & ANAWTHESWARAN (1993) mencionam a complexidade matemática do método quando comparado com as equações do método de diferenças finitas, o que acaba por requerer maior tempo de CPU e memórias durante a execução em computadores.

A grande desvantagem do método é que a enorme quantidade de cálculos envolvidos torna difícil a execução manual do mesmo, exigindo o emprego de programas de computador, mesmo para pequenos problemas.

2.2.5 O Uso do Método de Elementos Finitos no Processamento de Alimentos

O interesse da literatura científica no uso do Método de Elementos Finitos voltado para o processamento de alimentos tem aumentado nos últimos anos. Os alimentos formam sistemas complexos apresentando formas irregulares, propriedades frequentemente anisotrópicas e não uniformes, tornando o modelamento matemático um

desafio difícil. O método tem se mostrado uma ferramenta analítica muito importante, uma vez que, muitas das simplificações e considerações normalmente adotadas com relação às propriedades físicas dos alimentos (formas irregulares, materiais não homogêneos e anisotrópicos) podem ser eliminadas com o seu uso.

Uma revisão muito interessante das aplicações deste método é apresentada por PURI & ANAWTHESWARAN (1993). Os autores apresentam algumas aplicações em processos de esterilização, resfriamento, congelamento, transferência de massa, secagem e outros. A maioria dos estudos, no entanto, são limitados a análises bidimensionais. Pouco se tem feito com respeito a análises tridimensionais e análise conjuntas de transferência de calor e massa. Segundo os autores o método apresenta um enorme potencial a ser explorado em processamento de alimentos.

Aplicações do Método de Elementos Finitos na engenharia de alimentos também são apresentadas por SINGH & SEGERLIND (1974). Os autores apresentam uma teoria básica do método e duas aplicações em processos axisimétricos dependentes do tempo: o tratamento térmico de uma lata cilíndrica contendo material homogêneo e o aquecimento de uma coxa de frango composta de quatro materiais distintos. Os exemplos (simulados por computador) ressaltam duas grandes qualidades do método: o uso de geometrias irregulares e de materiais compostos.

TANDON & BHOWMIK (1986) avaliaram o processo térmico de bolsas flexíveis contendo alimentos condutivos, considerando a forma real das mesmas. Um Método de Diferenças Finitas modificado foi utilizado para resolver as equações de Fourier para condução de calor em duas dimensões. A transferência de calor foi analisada na seção transversal elíptica da bolsa, a qual foi representada por uma malha. A distribuição de temperaturas no produto e o valor de F_0 calculados pelo método físico foram comparados com resultados obtidos pela simulação utilizando-se o Método de Diferenças Finitas e pelo uso de um software (ANSYS) o qual utiliza-se do Método de Elementos Finitos. Segundo os autores, os

resultados encontrados foram bastante similares. Uma diferença máxima de temperatura encontrada pelos dois métodos de 1°C foi encontrada no ponto mais frio da embalagem.

NAVEH *et al.* (1983) utilizaram o Método de Elementos Finitos para avaliar o processamento térmico de purê de maçã em potes de vidro ("baby food"). Os autores concluíram que a flexibilidade do método permite simulações realísticas das condições de processamento de alimentos.

SASTRY *et al.* (1985) desenvolveram um modelo tridimensional para solução simultânea de transferência de calor e massa em cogumelos pelo Método de Elementos Finitos. O modelo proposto forneceu resultados bastante similares àqueles obtidos experimentalmente (erro máximo de 8% no modelo que estimou a retenção de agaritina)

BANGA *et al.* (1993) modelaram o processamento de atum sólido em latas considerando três tipos de aproximações para o problema: a) sistema homogêneo e isotrópico (Modelo A); b) sistema homogêneo e anisotrópico (Modelo B) e c) sistema heterogêneo e anisotrópico (Modelo C). Os três modelos foram validados através de dados experimentais. Os autores concluíram que o modelo C, o qual utiliza o Método de Elementos Finitos, é o mais rigoroso e apresenta a melhor predição de história térmica, no entanto, o tempo computacional é muito maior.

Enquanto as fórmulas empíricas para avaliação de processos térmicos continuam tendo aplicações para processos bem estabelecidos (geometrias simples, temperatura constante do meio de aquecimento, etc.), os métodos numéricos, para solução das equações diferenciais, tem ganho maior interesse para aplicações em situações mais realísticas onde as geometrias são complexas, as propriedades físicas dos alimentos não são constantes e as condições de contorno são dependentes do tempo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do Produto

O produto constitui-se de atum ralado em salmoura. O atum (*Katsuwonus pelamis*) foi adquirido junto a uma indústria de processamento de pescados já pré-processado (cozido em vapor a 105°C/1h, limpo e ralado). Foi adquirido um lote de tamanho suficiente para a realização de todos os experimentos. O produto foi mantido congelado em câmara à -18°C, sendo descongelado em pequenos lotes a cada experimento.

As bolsas foram preenchidas com 500g do produto (85% atum e 15% salmoura (p/p) a 2% de NaCl (p/v)), seladas à vácuo (700mm Hg) em uma seladora SELOVAC (Minivac CV 18 – Selovac Ind. & Com. Ltda, Brasil) e processadas a 121°C com sobrepressão de ar de aproximadamente 20 psi (\cong 138 kPa) e resfriadas até 35°C .

3.1.1 Determinação da Composição Centesimal do Atum

Foram realizadas as seguintes análises físico-químicas para caracterização do produto:

1. Nitrogênio total/proteínas (AOAC, 1975);
2. Lipídeos Totais (BLIGH & DYER, 1959);
3. Carboidratos Totais (HODGE & HOFREITER, 1962);
4. Cinzas (LESS, 1979);
5. Umidade (AACC, 1983).

3.1.2 Determinação da Carga Microbiana Inicial

Foram realizadas contagem total de mesófilos em placa (VANDERZANT & SPLITTSTOESSER, 1992) e a determinação de

anaeróbios mesófilos esporulados (VANDERZANT & SPLITTSTOESSER, 1992) para avaliar a carga microbiana inicial da matéria prima a ser processada.

3.1.3 Determinação das Propriedades Físicas

Foram determinados a condutividade térmica, o calor específico e a densidade do produto com a adição dos seguintes níveis de salmoura: 0, 10, 20, 25 e 30% (p/p). Estes valores permitiram a elaboração de modelos matemáticos para calor específico, densidade e condutividade térmica do produto em função da umidade do mesmo. Estes experimentos foram realizados junto à Universidade da Califórnia (Davis) no laboratório de processamento de alimentos sob orientação do Dr.R. Paul Singh.

3.1.3.1 Calor Específico (c_p)

O calor específico do produto foi determinado utilizado-se um DSC (Differential Scanning Calorimeter - Perkin-Elmer DSC7, Norwalk, Connecticut).

O atum foi descongelado em geladeira, adicionado de salmoura nos níveis pré-determinados e conservado sob refrigeração até a realização das análises. As determinações foram realizadas a uma taxa de aquecimento de 5°C/min, partindo-se de 25°C e atingindo até 60°C (NASSU, 1994).

3.1.3.2 Condutividade Térmica (k)

A condutividade térmica foi determinada por meio de dois métodos transientes: Um utilizando-se uma técnica recém desenvolvida (ELANSARI & SINGH, 1995) a qual faz uso de um "Differential Scanning Calorimeter" (DSC) e outro através da técnica da sonda linear ("Line Heat Source Probe"), conforme descrito por SWEAT and HAUGH (1974).

3.1.3.2.1 Método do DSC

O método desenvolvido por ELANSARI & SINGH (1995) utiliza-se de um DSC como fonte de energia ao sistema. Um reservatório para conter a amostra foi adaptado sobre o prato do DSC (FIGURA 1). O método considera a amostra como uma placa plana finita a temperatura inicial uniforme, a qual é aquecida pela parte inferior a uma razão constante por uma fonte de calor (DSC). Após um determinado período, a fonte de calor é abruptamente desligada. Através das equações de transferência de calor em regime transiente é possível calcular condutividade e difusividade térmica da amostra. Uma descrição detalhada do método e dos cálculos envolvidos pode ser encontrada no trabalho dos autores acima referenciados.

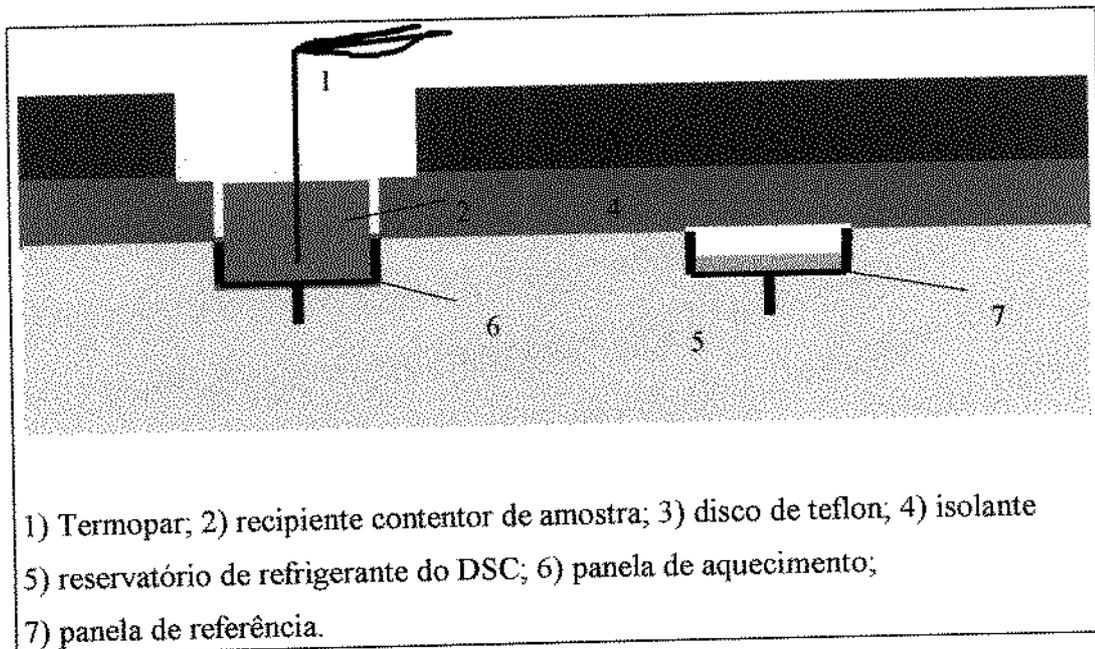


Figura 1 : Representação Esquemática de um DSC Adaptado para Determinação de k e α .

O sistema montado para a determinação da condutividade e difusividade térmica é composto de um DSC (Perkin-Elmer DSC7, Norwalk, Connecticut) equipado com um controlador. A temperatura no interior da amostra era acompanhada através de um termopar tipo T (bitola 21) modelo HYP-2 (Omega Engr. Company, Stamford, Connecticut) acoplado a um sistema de aquisição de dados (Hewlett-Packard. Lab tech,

Wilmington) e um microcomputador IBM PC. A FIGURA 2 apresenta uma representação esquemática do sistema.

Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10°C/min dado ao fato da mesma ter apresentado uma boa correlação ($r^2 \geq 0.99$) entre o fluxo de calor (Q) e o tempo.

Uma curva de calibração foi construída utilizando-se glicerol e gel de agar (1,5%), duas substancias com difusividade e condutividade térmica bem conhecidas.

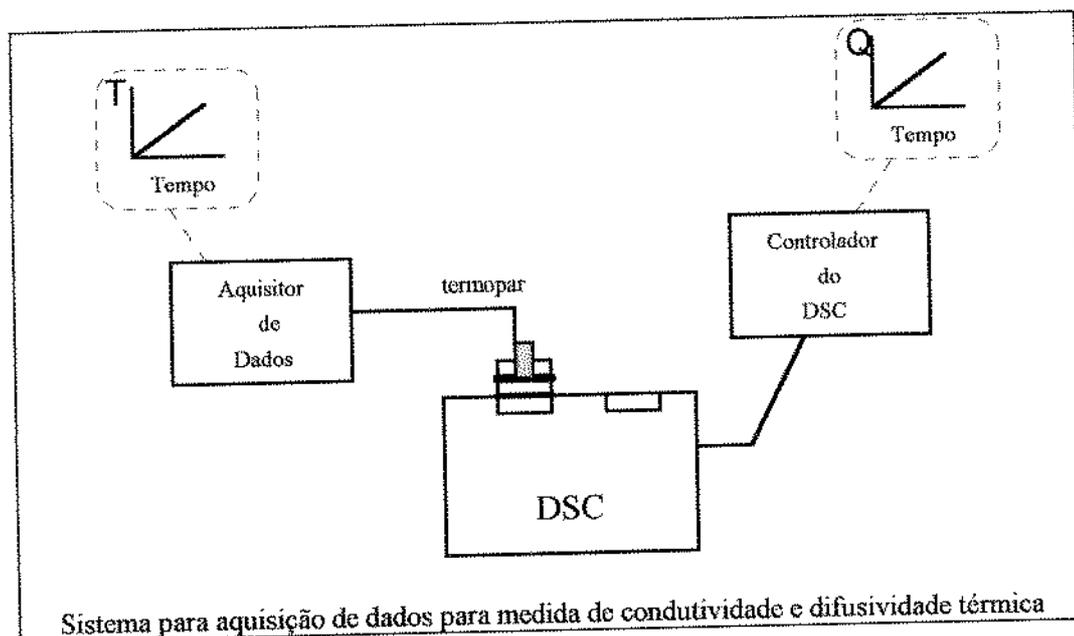


Figura 2 : Representação Esquemática do Sistema Montado para Determinação de k e α Utilizando-se um DSC.

Os dados de temperatura foram colhidos a cada 5 segundos durante 6 minutos. Com o perfil de temperatura no produto e a curva do fluxo de calor versus tempo (DSC) pôde-se obter k e α através de um programa desenvolvido em FORTRAN pelos referidos autores. O programa utiliza o método dos mínimos quadrados para estimar o valor da condutividade e difusividade térmica da amostra.

3.1.3.2.2 Sonda Linear

A teoria da determinação da condutividade térmica pelo método da sonda linear (“line heat source probe”) tem sido revista por vários autores (NIX e al, 1967; HOOPER & LEPPER, 1950). O sensor utilizado é constituído de uma agulha fina (0,8mm) na qual é inserido um fio de constantan que ao ser percorrido por uma corrente elétrica produz calor a uma razão constante (fonte de calor linear). Além disso, uma junta de termopar também é introduzida na agulha, isolada do fio de constantan por uma resina plástica A FIGURA 3 apresenta uma representação do sensor utilizado.

Basicamente, o método consiste em inserir o sensor no interior da amostra, inicialmente a uma temperatura constante. Quando a fonte de calor é ativada, a mesma produz calor a uma taxa constante e a temperatura do interior da agulha é então medida pela junta do termopar. Um gráfico do logaritmo do tempo versus temperatura produz uma reta cuja inclinação é utilizada para calcular a condutividade térmica da amostra, como segue:

$$k = \frac{Q}{4\pi(S)} \quad (3.1.3.2.2.1)$$

- k = condutividade térmica (W/m °C)
- Q = $i^2 r$ = energia gerada pela fonte (W/m)
- r = 223 Ω /m
- i = 0,2 A
- S = inclinação da curva T vs. ln(t)
- T = temperatura monitorada próximo à fonte (°C)
- t = tempo (s)

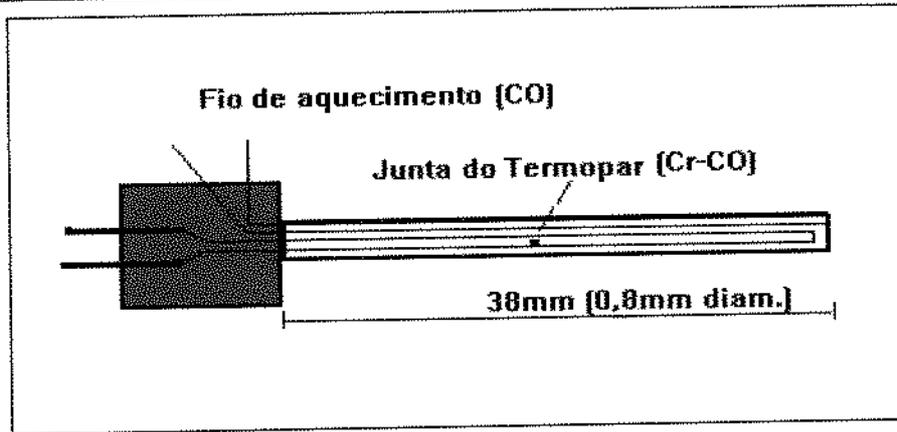


Figura 3 : Sonda Linear para Medida de Condutividade Térmica

A FIGURA 4 apresenta uma representação esquemática do sistema montado para a aquisição dos dados para a determinação da condutividade térmica utilizando-se o sensor. Os terminais do termopar (tipo E) foram ligados a um aquisitor de dados (Campbell Scientific 21X Data Acquisition System, Campbell Scientific, Logan, UT) programado para fazer leituras de temperatura a cada 0,3 segundos. O circuito de aquecimento do sensor foi ligado a um regulador de corrente de modo que a mesma era mantida a 200 mA.

O sistema foi calibrado utilizando-se glicerina e gel de agar a 0,5% (p/p).

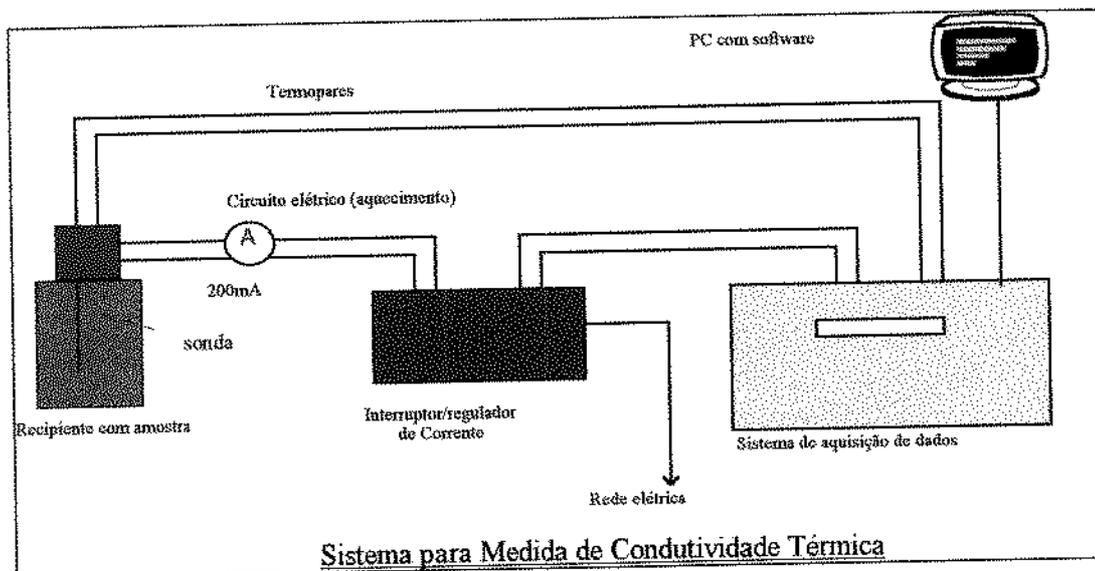


Figura 4 : Representação Esquemática do Sistema de Aquisição de Dados para Determinação de k pelo Uso da Sonda Linear

Um recipiente para conter as amostras foi construído em acrílico (FIGURA 5) para que acomodasse o material e permitisse que o sensor permanecesse imóvel no centro do mesmo durante as leituras. Todo cuidado foi tomado durante a acomodação das amostras no recipiente de modo a evitar a presença de ar e a compressão da mesma, fatores estes que podem causar alterações nos valores da condutividade térmica.

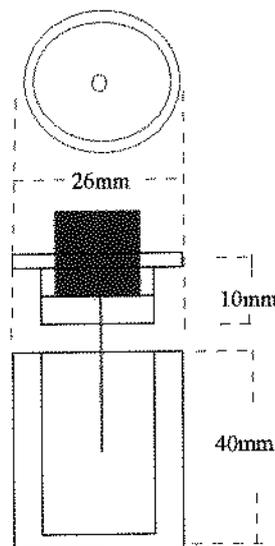


Figura 5 : Recipiente para Contenção de Amostras

3.1.3.3 Difusividade Térmica

A difusividade térmica foi calculada através da relação:

$$\alpha = k / c_p \rho \quad (3.1.3.3.1)$$

O valor da condutividade térmica utilizado para o cálculo da difusividade foi aquele determinado pelo método descrito em 3.1.3.2.2, uma vez que o mesmo mostrou-se mais preciso que aquele descrito em 3.1.3.2.1.

3.1.3.4 Densidade

A densidade foi obtida pesando-se um volume conhecido de amostra. O recipiente construído para contenção de amostras (FIGURA 5)

foi utilizado como medida de volume. O produto era acondicionado cuidadosamente no interior do recipiente de modo a preencher totalmente o volume, retirando todo ar do interior do mesmo, porém, evitando a compressão do produto.

3.2 Embalagem

A bolsa utilizada é fabricada pela Toyo Seikan Kaisha Ltd. Trata-se de uma bolsa destinada ao mercado institucional e indicada pelo fabricante como tipo **hiRP-F** com as seguintes características:

- Estrutura:
 - 12 μ m PET (polietileno tereftalato)
 - 15 μ m Nylon
 - 09 μ m Alumínio
 - 50 μ m PP (polipropileno)
- Dimensões: 200 x 230 mm

3.2.1 Otimização das Condições de Termossoldagem das Bolsas

A seladora utilizada opera com um sistema de vácuo promovido por uma bomba de vazão nominal de 20m³/h. A selagem das bolsas é conseguida através de um sistema de mandíbulas que são acionadas automaticamente assim que o vácuo pré-estabelecido é obtido. Uma das mandíbulas é dotada de uma resistência elétrica que é aquecida e provoca a solda do material da bolsa. A seladora permite, através de dois botões de controle, o ajuste do vácuo e do tempo de solda.

O objetivo deste ensaio foi otimizar o tempo de solda e de vácuo de maneira a obter: um volume máximo de 5ml de ar residual e uma solda eficiente que promovesse a fusão do material na região de soldagem, avaliada visualmente.

3.2.1.1 Avaliação Visual da Área de Selagem

A área de selagem de topo das bolsas foi observada quanto a presença de irregularidades ocasionadas pelo tempo de exposição durante a solda, tais como bolhas e rugas.

Foi utilizado como critério uma escala proposta por OLIVEIRA & ALVES (1992), onde diferentes graus são atribuídos a aparência da área de solda das bolsas: como segue:

- Grau 1 (G1): nenhuma alteração visível;
- Grau 2 (G2): pequeno enrugamento pelo calor em até 50% da extensão da termossoldagem;
- Grau 3 (G3): pequeno enrugamento pelo calor e/ou irregularidades superficiais em 50 a 100% da extensão da termossoldagem;
- Grau 4 (G4): médio enrugamento pelo calor e/ou irregularidades superficiais em toda extensão da área de termossoldagem e perda de brilho;
- Grau 5 (G5): acentuado enrugamento pelo calor e/ou irregularidades superficiais em toda a extensão da termossoldagem e perda de brilho.

3.2.1.2 Determinação do Volume de Ar Residual

A selagem das bolsas foi otimizada de modo a permitir o maior vácuo possível afim de se obter um mínimo de ar residual no interior da embalagem. O volume de ar residual foi medido utilizando-se o método descrito por CAMPBELL & RAMASWAMY (1992). O método consiste em abrir cuidadosamente a embalagem debaixo d'água permitindo que os gases nela contidos escapem e sejam coletados por uma bureta invertida.

3.2.1.3 Determinação das Dimensões Características da Embalagem com o Produto

A forma característica da bolsa (tipo travesseiro) obtida após a selagem com o produto foi determinada preenchendo-se uma embalagem com o produto e resfriando-a em geladeira. A embalagem era, então, cuidadosamente cortada em sua seção transversal e longitudinal. Estas seções foram desenhadas em papel milimetrado afim de que as dimensões fossem utilizadas para construir o modelo tridimensional no programa para a determinação do perfil de temperatura pelo método de elementos finitos.

3.3 Equipamentos e Processos

3.3.1 Adaptação da Autoclave para Processamento de Bolsas

A autoclave utilizada no processamento é do tipo horizontal, descontínua fabricada pela Allpax (*ALLPAX, Products Inc., USA*), completamente operada via microcomputador (PS/2 IBM) e controlada por um software específico (“Control View”- *Allen Bradley*).

O tanque de trabalho da autoclave possuía um cesto (0,8m de comprimento x 0,6m de largura x 0,58m de altura) o qual continha as bandejas onde eram acomodadas as bolsas. As bandejas foram construídas em aço inox de 2mm de espessura, 0,56m x 0,70m de tamanho, perfurado com furos circulares de 8mm de diâmetro dispostos de forma hexagonal, perfazendo uma área aberta total de 48%. As bandejas continham divisórias em aço inox de 2mm de espessura por 15mm de altura que serviram para separar as bolsas, sendo possível o processamento de vários tamanhos de embalagens.

3.3.2 Calibração de Termopares

Foram utilizados termopares flexíveis tipo T de 12,7 cm (*Ecklund Custom Thermocouples, USA*) conectados por conectores C-10 (*Ecklund Custom Thermocouples, USA*) e fios de extensão de cobre-

constantan de 0,80mm de diâmetro (*Honeywell, Inc., USA*) à unidade de aquisição de dados DORIC 245 A (*Beckman Ind., USA*) a qual possui uma precisão de 0,1°C. A FIGURA 6 apresenta uma representação esquemática do sistema de aquisição de dados de temperatura dentro da autoclave.

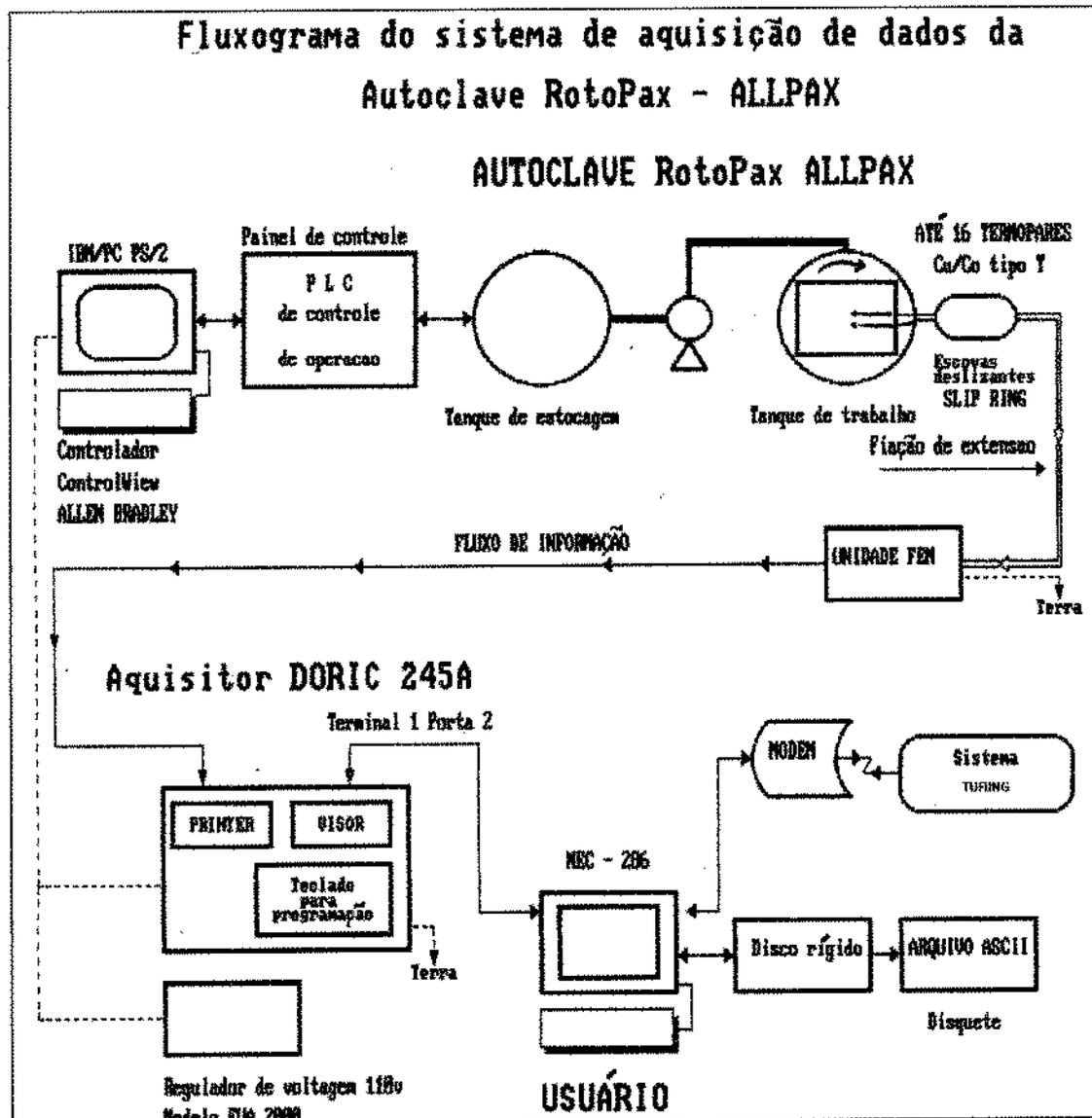


Figura 6 : Fluxograma do Sistema de Aquisição de Dados da Autoclave ANDREOLLI (1994).

Os termopares foram calibrados no interior da autoclave afim de se reproduzir as condições de processamento. Foram utilizados como padrão, dois termopares flexíveis tipo T (*Omega Engineering*) fabricados com fio bitola 36 (0,127mm) recobertos com teflon, previamente calibrados

contra um RTD de platina (*Cole-Parmer Instr. Co., USA*) em um banho de óleo (PolyStat modelo 1205-20, *Cole-Parmer Instr. Co., USA*) com precisão de $\pm 0,005^{\circ}\text{C}$.

Os termopares foram fixados no centro da autoclave através de um sistema descrito por CARDELLI (1992), o qual permite que as juntas de medidas dos mesmos fiquem bem próximas à junta dos termopares flexíveis utilizados como padrão. Foram utilizadas as seguintes temperaturas para a calibração: 100°C , 105°C , 110°C , 115°C , 118°C , 121°C e 123°C , mantendo-se a pressão da autoclave à 20psi. Curvas de calibração foram obtidas utilizando o programa PGC que faz uma regressão linear dos valores obtidos pelos termopares a serem calibrados contra aqueles utilizados como padrão.

3.3.3 Distribuição de Temperaturas na Autoclave

O conhecimento da distribuição de calor numa autoclave se faz necessário afim de se avaliar a homogeneidade de temperatura e identificar possíveis pontos frios no interior da mesma, com as modificações realizadas. Foram realizados dois tipos de ensaios para avaliar a distribuição de temperaturas na autoclave: 1) estudar o efeito o espaçamento entre as bandejas contendo bolsas e, 2) o efeito da temperatura de processo.

Para avaliar o efeito do espaçamento entre as bandejas dois arranjos distintos contendo cinco bolsas em cada uma foram analisados separadamente. O primeiro consistindo de quatro blocos de bandejas contendo bolsas e o segundo sete blocos. Denominou-se de bloco um conjunto de duas bandejas separadas por um espaçador (2,0cm) onde foram contidas as bolsas, evitando a expansão das mesmas durante o processo térmico. Estes blocos, por sua vez, foram separados por espaçadores afim de permitir canais de circulação de água. No arranjo de quatro blocos, os mesmos foram separados com espaçadores de 8cm e no de sete blocos com 4cm. As FIGURAS 7 e 8 apresentam detalhes dos blocos de bandejas com espaçadores de 4 e 8cm, respectivamente.

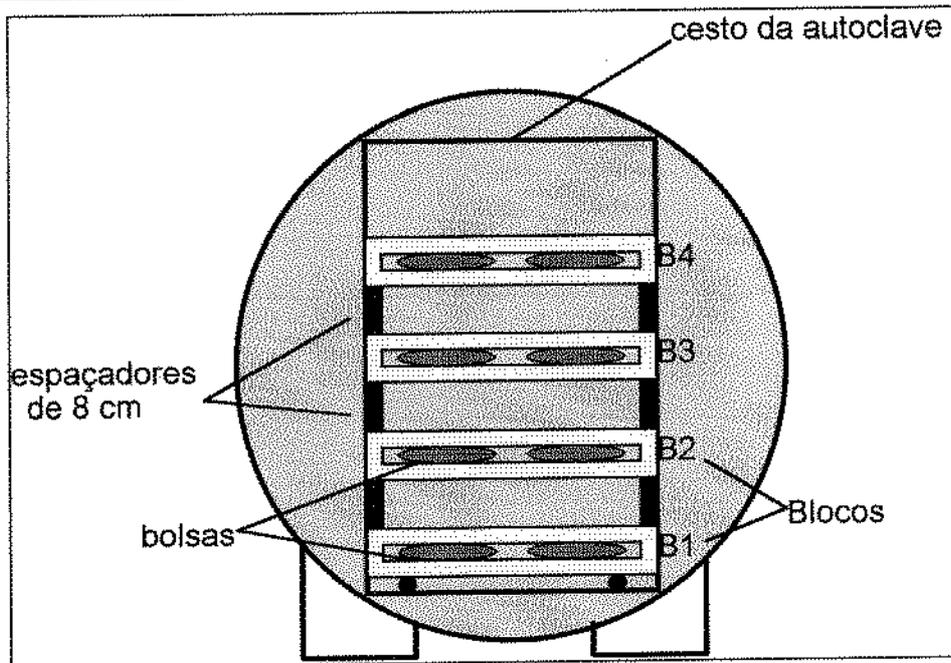


Figura 7 : Detalhe do Arranjo de Quatro Blocos de Bandejas (CARVALHO, CRISTIANINI & MASSAGUER, 1996)

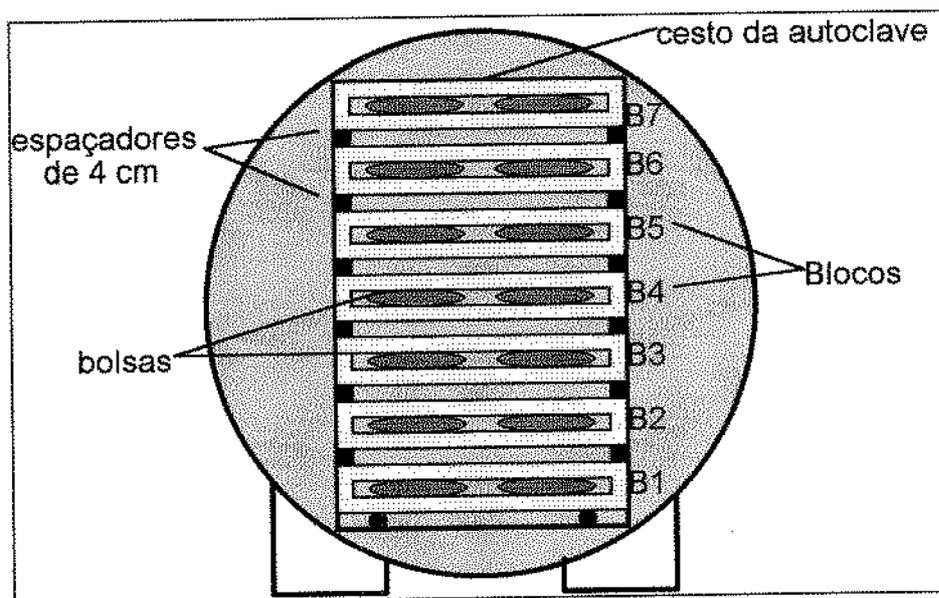


Figura 8 : Detalhe do Arranjo de Sete blocos de Bandejas (CARVALHO, CRISTIANINI & MASSAGUER, 1996)

A FIGURA 9 apresenta a disposição dos termopares nas bandejas para avaliar diferentes posições dentro da autoclave.

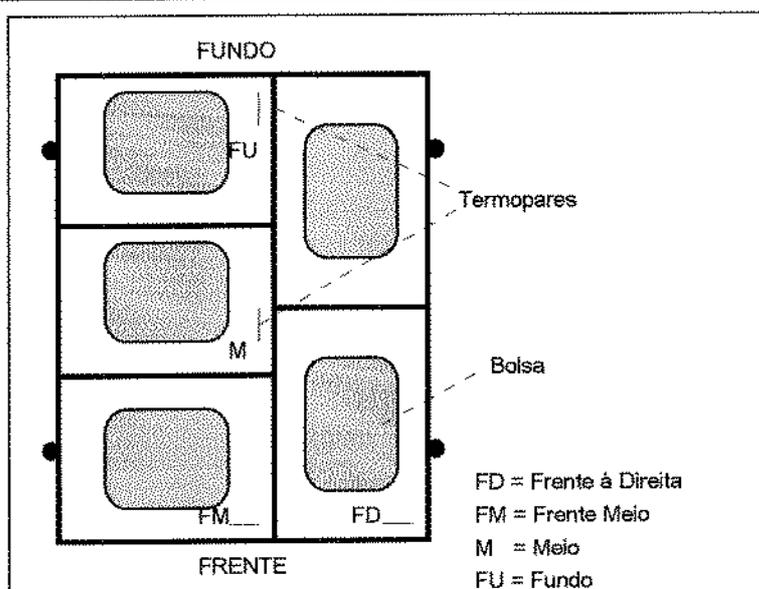


Figura 9 : Disposição das Bolsas nas Bandejas e a Localização dos Termopares

A TABELA 2 apresenta um resumo das condições utilizadas no ensaio para avaliar o efeito do espaçamento na distribuição de temperaturas no interior da autoclave.

Tabela 2 : Resumo dos Ensaios Realizados para Avaliar o Efeito do Espaçamento entre Blocos

ENSAIO	Espaço entre Blocos (cm)	Processo T(°C)	kPa	Blocos com Termopares	Posição dos Termopares
1	8	121	138	B1-B3-B5-B7	FM –FD-C
2	4	121	138	B1-B3-B5-B7	FM –FD-C

Para avaliarmos o efeito da temperatura de processo na distribuição de calor na autoclave, ensaios foram realizados: a 121°C e a 115°C, à pressão constante de 20psi. Apenas o arranjo de sete bandejas foi considerado nesta avaliação.

Tabela 3 : Resumo dos Ensaios Realizados para Avaliar o Efeito da Temperatura de Processo

ENSAIO	Espaço entre Blocos (cm)	Processo T(°C)	kPa	Blocos com Termopares	Posição dos Termopares
1	4	115	138	B1-B3-B5-B7	FM –FD-C
2	4	115	138	B1-B3-B5-B7	FM –FD-C
3	4	121	138	B1-B3-B5-B7	FM –FD-C
4	4	121	138	B1-B3-B5-B7	FM –FD-C

Os dados de temperatura foram obtidos por um aquisitor de dados (DORIC 245 A, *Beckman Ind. USA*) a cada minuto e armazenados em microcomputador, mantendo-se a temperatura constante por 30 minutos durante a fase de esterilização (1 minuto após o tempo de subida da autoclave) denominada STER III neste tipo de equipamento.

Foram utilizados 16 termopares flexíveis tipo T (*Ecklund Custom Thermocouples, USA*) de 4 e 5 polegadas dispostos de maneira estratégica em pontos diferentes no cesto, mostrados na Figura 9. Os dados de temperatura foram comparados a um RTD localizado na parte inferior do tanque de trabalho, o qual faz o controle de temperatura da água de entrada do equipamento, e um termômetro de mercúrio (*Incotherm Termômetros Ltda, Brasil*) instalado na autoclave. Os dados foram analisados estatisticamente por tempo e por posição, conforme as determinações do NFPA (National Food Processor's Association, Washington, DC, 1985) descritas por RAMASWAMY *et al.* (1991).

3.3.4 Ensaios de Penetração de Calor nas Bolsas

O objetivo dos ensaios de penetração de calor é obter as taxas de aquecimento (f_h) e resfriamento (f_c), bem como o atraso térmico do aquecimento (j_h) e do resfriamento (j_c) do produto. Estes valores foram utilizados para estimar o tempo de processo (tempo de Ball) necessário para alcançarmos um F_0 de 7 min no produto, utilizando-se o programa ESPERA (disponível no Laboratório de Termobacteriologia da FEA-UNICAMP). O referido programa utiliza-se das fórmulas de HAYAKAWA (1970) para estimar a porção curvilínea da curva de aquecimento para calcular o tempo de Ball e/ou o valor de esterilização no ponto crítico.

As temperaturas no centro das bolsas foram medidas a cada 30 segundos através de termopares flexíveis do tipo T de 12,7cm de comprimento (*Ecklund Custom Thermocouples, USA*), introduzidos nas mesmas por meio de dispositivos apropriados (Stuffing box for retort pouch Ecklund). As juntas dos termopares foram fixadas no centro

geométrico do produto utilizando-se suportes de teflon em forma de cruz de 1,9cm (espessura da bolsa com produto) de altura. A FIGURA 10 apresenta o esquema utilizado para a fixação dos termopares nos ensaios de penetração de calor.

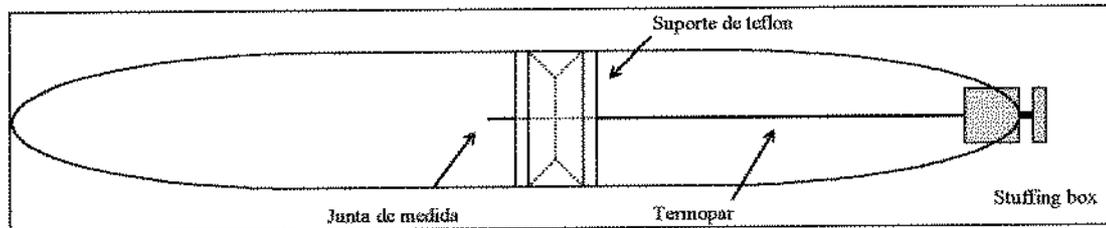


Figura 10 : Esquema para Fixação de Termopares no Centro das Bolsas

Foram realizados 2 ensaios com pelo menos seis bolsas dispostas nas bandejas 1 e 3, regiões estas identificadas como mais frias nos experimentos de distribuição de calor dentro da autoclave. Três termopares foram utilizados para a aquisição de temperatura do meio de aquecimento próximas às bolsas. As temperaturas no interior das bolsas foram coletadas até que se atingisse uma diferença de 1°C em relação à temperatura do meio de aquecimento.

A TABELA 4 apresenta as condições utilizadas em dois ensaios de penetração de calor realizados. PFLUG (1975) recomenda pelo menos seis embalagens para se obter uma média dos parâmetros de penetração de calor. Dois ensaios foram realizados uma vez que, por problemas nos termopares, não foi possível obter resultados de seis bolsas logo no primeiro ensaio.

Tabela 4 : Parâmetros de Processo nos Ensaio de Penetração de Calor

Parâmetros de Processo	Ensaio I	Ensaio II
Temperatura inicial do Produto (°C)	26	28
Temperatura de Média Processo (°C)	121,5	122,0
Temperatura do Meio de Resfriamento (°C)	24	28
Tempo de Subida (“come-up time”)(min)	6,0	6,5
Tempo de Aquecimento (min)	26	26
Tempo de Resfriamento (min)	20	20

3.3.5 Ensaio de Determinação do Perfil de Temperaturas no Interior das Bolsas

Com o intuito de validar os modelos propostos, nove experimentos foram realizados utilizando-se as condições de tempo, temperatura e pressão estabelecidas para o processo. A FIGURA 11 apresenta a configuração da autoclave para a execução das etapas de aquecimento e resfriamento. Em cada processamento, duas bolsas foram montadas contendo três termopares tipo T (OMEGA TT-T30) cada uma, dispostos na seção transversal da mesma, como mostra a FIGURA 12. As bolsas foram processadas no bloco 3 nas posições FD e FU.

	TEMPERATURA		PRESSÃO		RPM	TEMPO	CESTO 1=V 0=H
	Rampa	Ajuste	Rampa	Ajuste	Ajuste	Segundos	
PREPARO	125.0		27.0				
ESTER I	122.0				0.0		0
ESTER II	20.0	122.0	15.0	21.0	0.0	261	0
ESTER III	20.0	122.0	15.0	21.0	0.0	1380	0
RESFR I			0.5	18.0	0.0		0
RESFR II	45		8.0	2.70	0.0	480	0
RESFR III	40				0.0	300	0
DRENO	40.0		0.0				0
	Rampa	3.00	Temp Ramp		5.00		
	Tempo base segundos		Tempo base Seg.				

Figura 11 : Tela do Programa para a Configuração da Autoclave para Processamento das Bolsas (V = vertical; H = horizontal)

Um suporte de teflon de 2mm de espessura e 19mm de altura foi construído para manter as juntas dos termopares no centro da bolsa, a 5mm e a 2,5mm da superfície da mesma. O suporte tinha uma base de 30mm de comprimento e 2mm de espessura que foi colada à bolsa com cola resistente a altas temperaturas (Loctite 406/757). Os fios dos termopares deixavam a bolsa por uma extremidade e os furos foram selados com cola de silicone. As bolsas eram pesadas antes e após o processo para verificar a ocorrência ou não de vazamentos nas mesmas.

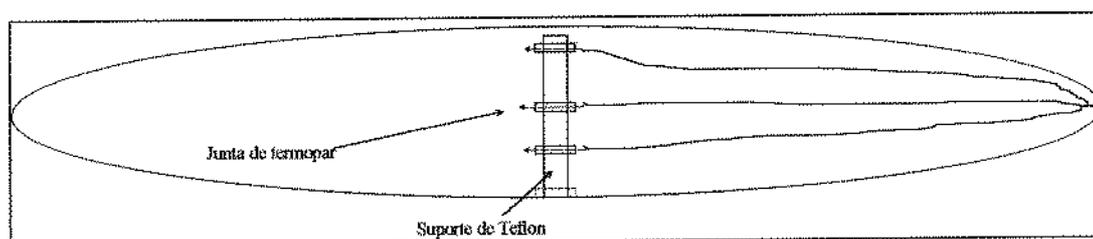


Figura 12 : Esquema de Fixação de Termopares para o Estudo do Perfil de Temperaturas Dentro das Bolsas

Para a realização destes ensaios, o atum foi descongelado e preparado na véspera, sendo mantido sob refrigeração. Minutos antes do processo, as bolsas foram preenchidas com o produto, seladas a vácuo e colocadas nas bandejas para o processamento. A autoclave foi preenchida com água a temperatura ambiente e assim permaneceu até que a temperatura no centro das bolsas se estabilizassem (temperatura constante após três leituras de 30 segundos). Este procedimento teve como objetivo estabelecer uma certa homogeneidade de temperatura inicial das bolsas

Uma vez alcançado o equilíbrio, o tanque de trabalho da autoclave era esvaziado e dava-se início ao processamento.

3.3.6 Coeficiente Convectivo Global de Transferência de calor (h)

Devido ao estreito perfil do laminado de fabricação da bolsa, o coeficiente convectivo de transferência de calor (h) durante o processamento térmico pode ser dito como “global”, uma vez que, em

adição ao coeficiente de transferência de calor externo entre o meio de aquecimento e a bolsa, também está incluída a resistência entre a bandeja e a embalagem.

O coeficiente convectivo de transferência de calor para uma placa plana pode ser obtido através da inclinação da curva de aquecimento (f_h). De acordo como descrito por BALL & OLSON (1957):

$$\lambda_1^2 = 2,303/(\alpha f_h) \quad 3.3.6.1$$

onde α é a difusividade térmica, f_h é a taxa de aquecimento e λ_1 é a primeira raiz da equação:

$$(\cotg \lambda) a = (k/h) \lambda \quad 3.3.6.2$$

onde a é metade da espessura da placa e k a condutividade térmica do material sendo aquecido. Assim, de 3.3.6.1 e 3.3.6.2 obtemos:

$$h = k (2,303/(\alpha f_h))^{1/2} \operatorname{tg} (2,303 a^2/(\alpha f_h))^{1/2} \quad 3.3.6.3$$

Ainda, a solução exata para uma placa plana infinita de espessura $2a$ com um coeficiente de película h na superfície é dada por (ARPACI, 1966):

$$U(x, Fo) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \operatorname{sen}(\beta_n)}{\beta_n + \operatorname{sen} \beta_n \cdot \cos \beta_n} \exp(-\beta_n^2 \cdot Fo) \cdot \cos(\beta_n \cdot x/a) \quad 3.3.6.4$$

onde U é o adimensional de temperatura, x é a distância a partir do centro da placa, a é a metade da espessura da placa, Fo é o número de Fourier e β_n é a n ésima raiz positiva de $\beta \tan \beta = Bi$

Sendo assim, uma família de curvas pode ser obtida graficando-se a equação 3.3.6.4 tendo por variável apenas o coeficiente convectivo (h) de transferência de calor. Construindo-se um gráfico tendo nas abcissas os valores estimados de temperatura ao longo do tempo pela expressão 3.3.6.4 e nas ordenadas valores de temperatura medidas experimentalmente

no centro da bolsa, pode-se ajustar uma reta aos pontos com uma regressão linear. A FIGURA 13 apresenta um exemplo de uma transformação axial obtida de um perfil de temperaturas no centro de uma bolsa.

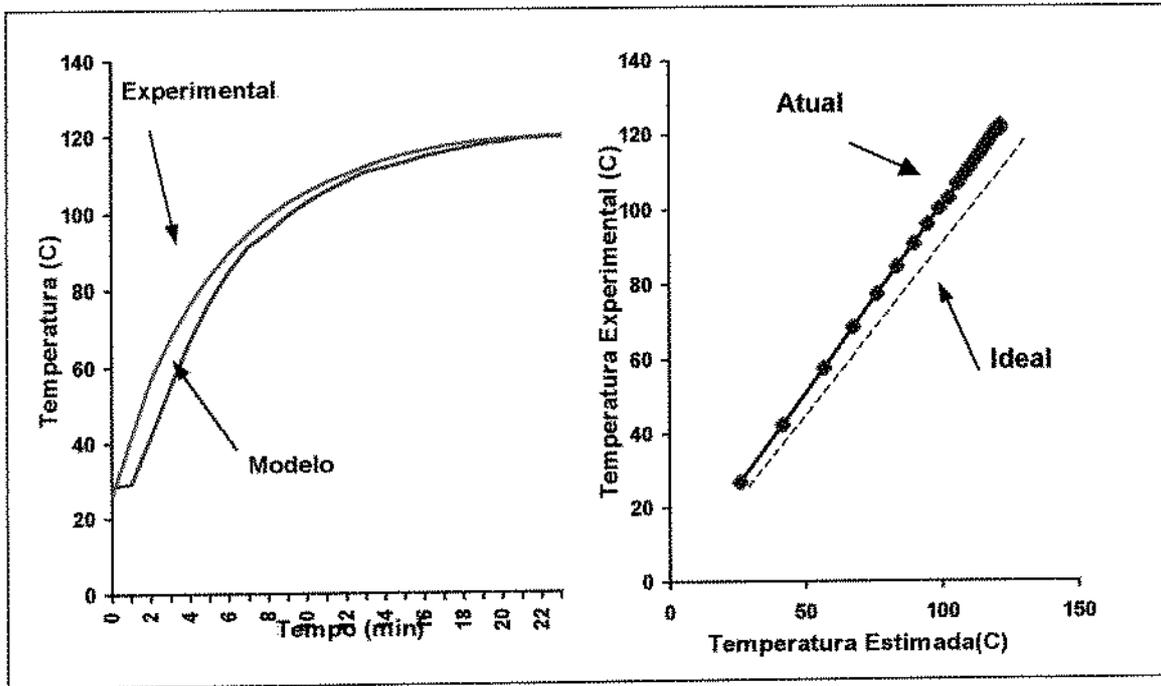


Figura 13: Exemplo de uma Transformação Axial Obtida para um Perfil de Temperaturas no Centro da Bolsa

Em uma situação ideal, onde o valor de h usado na expressão 3.3.6.4 fosse igual ao real, a inclinação da reta formada seria igual a 1. Deste modo, para valores de h maiores que o real, o valor da inclinação da reta seria menor que a um e para valores de h menores que o real, maior que a unidade. Assim, otimizando-se o valor da inclinação da reta formada pelas temperaturas geradas pelo modelo e as temperaturas reais medidas no centro da bolsa pode-se estimar o valor real de h para o processo.

A inclinação da curva forçada a passar pela origem, em coordenadas cartesianas, é dada por:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2} \quad 3.3.6.5$$

Um programa foi desenvolvido em PASCAL para otimizar o valor de h utilizando-se os valores experimentais de penetração de calor nas bolsas.

O programa utiliza-se do valor de h estimado pela expressão 3.3.6.3 como valor inicial para as iterações para o cálculo da inclinação da reta. Um método de bisseção foi utilizado para encontrar a raiz do problema entre $h_1=0,8h$ e $h_2=1,8h$. O programa utiliza como critério de parada o fato da inclinação calculada da reta estar próxima a unidade ($|s-1| < 0,0001$), onde 's' é a inclinação da reta, ou um número máximo de iterações igual a dez. A cada iteração o programa calculava também o coeficiente de correlação R^2 da reta.

3.3.7 Ensaio de Processamento Térmico e de Esterilidade Comercial do Produto

O processo térmico aplicado ao produto foi correspondente a um F_0 de 7 minutos. Embora seja o *Clostridium botulinum* tipo E o mais encontrado em pescados, decidiu-se por empregar o $D_{121}^{\circ C}$ do tipo A (0,21 min) pois este último possui uma maior resistência. O valor de F_0 foi selecionado considerando-se que o produto é de baixa acidez a ser comercializado em temperaturas inferiores a $35^{\circ C}$. Alguns autores (OLIVEIRA *et al.*, 1988; OLIVEIRA *et al.*, 1986) utilizaram valores de F_0 entre 6,4 e 9,0 min para atum em óleo comestível embalado em embalagens flexíveis. ADAMS *et al.* (1983) utilizaram um F_0 de 6,0 minutos para atum em salmoura.

O monitoramento do processo foi realizado através de uma função específica do aquisitor de dados (DORIC 245 A (Beckman Ind., USA), o qual calculava automaticamente e em forma aditiva o valor de F_p entregue ao produto, baseado na temperatura lida no centro do mesmo a cada leitura. O processamento das bolsas foi estático, sendo as mesmas colocadas na posição horizontal e processadas a $121^{\circ C}$.

Um processo foi realizado com a autoclave totalmente preenchida (35 bolsas) as quais foram incubadas a 37°C por dez dias para serem observadas quanto a quaisquer anormalidades ou estufamento.

3.4 Modelamento Matemático do Perfil de Temperaturas na Bolsa

Quatro modelos matemáticos foram gerados, sendo um utilizando a expressão 3.3.6.4, dois utilizando-se elementos finitos (um bidimensional e outro tridimensional) e um utilizando-se fórmulas empíricas descritas por HAYAKAWA (1970).

Os quatro modelos foram comparados estatisticamente com o perfil de temperatura obtido pelo experimento prático.

3.4.1 Elementos Finitos

O modelo de elementos finitos foi gerado utilizando-se o software ANSYS 5.3 (Swanson Analysis Systems, Inc.) o qual utiliza o referido método para a resolução das equações de transferência de calor.

Um modelo bidimensional foi construído considerando o contorno real da seção transversal da bolsa preenchida com o produto, conforme descrito em 3.2.1.3. A FIGURA 14 apresenta metade da seção transversal da bolsa com a malha de nós e os respectivos elementos aplicados (considerou-se axissimetria). Analogamente, um modelo tridimensional foi obtido utilizando-se as características geométricas da bolsa (FIGURA 15).

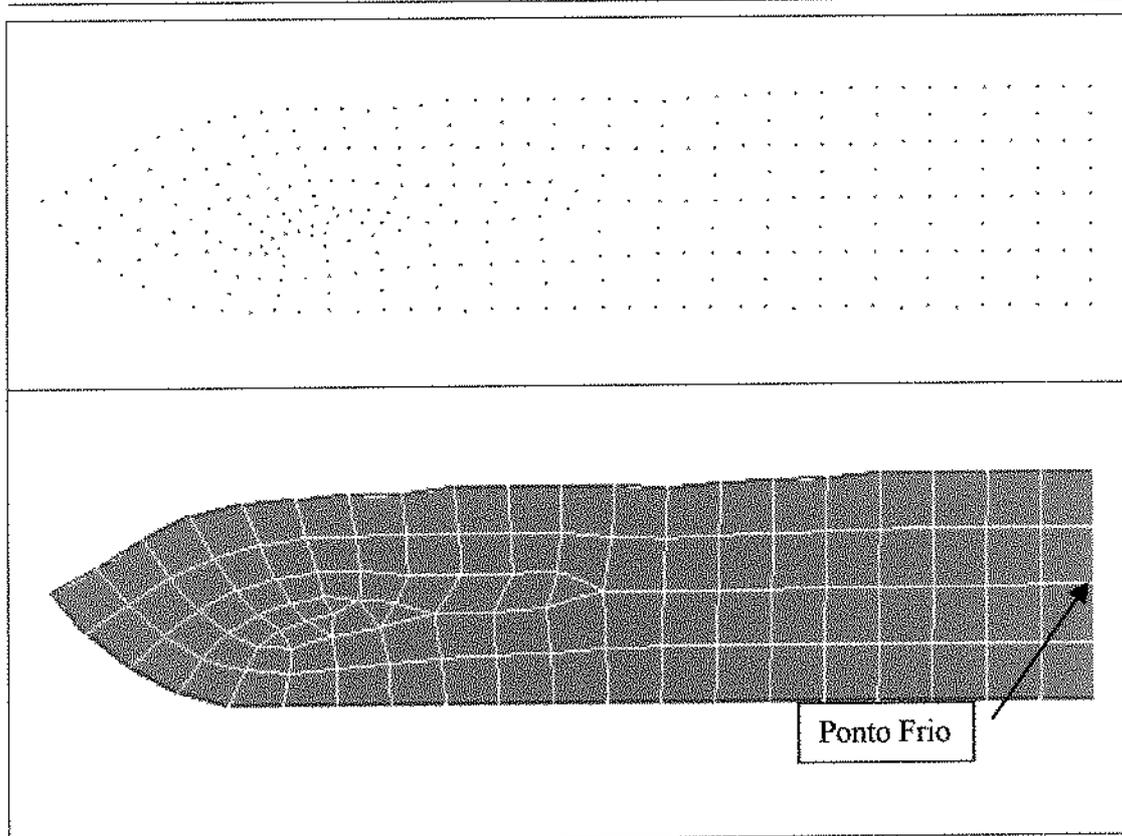


Figura 14: Seção Transversal da Bolsa com a Representação dos Nós e a Respectiva Malha de Elementos Utilizada no Modelo Bidimensional

As malhas foram geradas de tal modo a obter quatro elementos (9 nós) na seção central da bolsa (região do ponto frio).

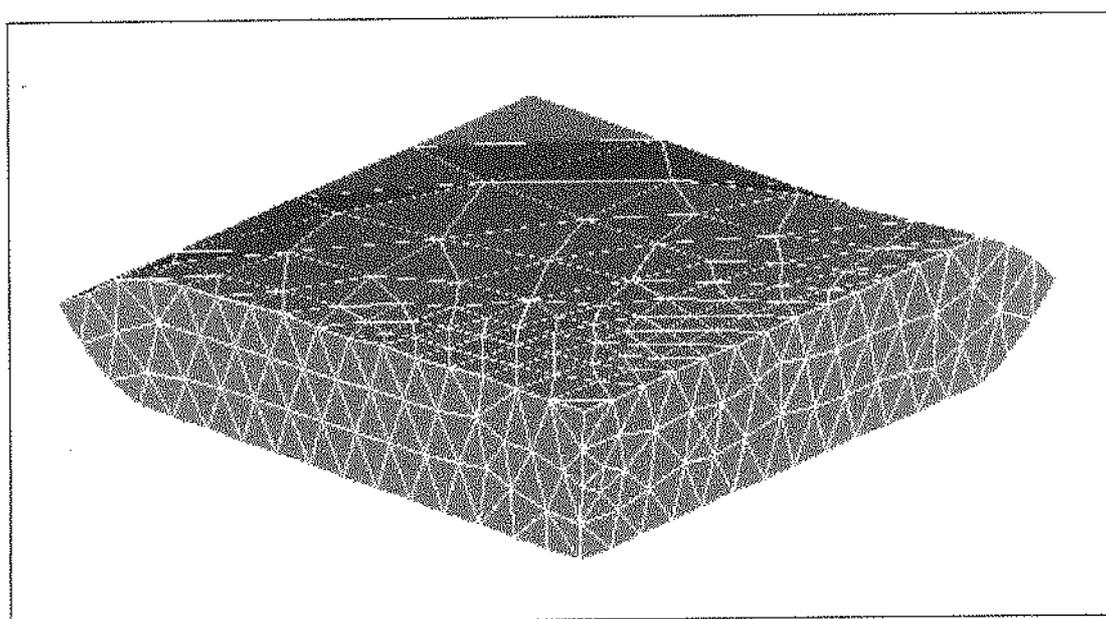


Figura 15: Seção Utilizada no Modelo Tridimensional

Elementos com características de análises térmicas de transferência de calor por condução foram utilizados na construção dos modelos. A FIGURA 16 apresenta algumas das características dos elementos disponíveis na biblioteca do ANSYS que foram utilizados nos dois modelos. O elemento “PLANE77”, utilizado no modelo bidimensional, é quadrilateral (permite deformar-se para tornar-se um triângulo) e possui 8 nós. Para o modelo tridimensional foi escolhido o “SOLID87” com 10 nós, que por ser tetraédrico adapta-se bem à geometria da bolsa, permitindo também deformação.

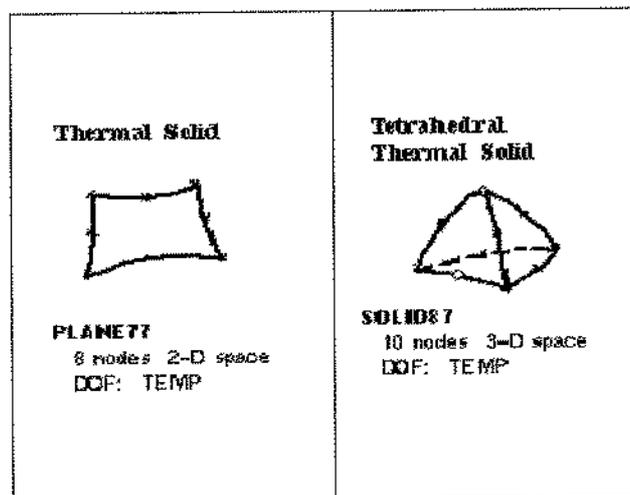


Figura 16: Características dos Elementos Utilizados nos Modelos Bi e Tridimensional

A TABELA 5 apresenta a característica dos modelos gerados para análise através do método de elementos finitos.

Tabela 5: Características dos Modelos Gerados para Análise por Elementos Finitos

Modelo	Tipo de Elemento	Nº de nós no modelo	Nº de elementos no modelo
Bidimensional	Quadrangular com 8 nós (PLANE77)	324	95
Tridimensional	Tetraédrico com 10 nós (SOLID87)	1762	882

Uma macro foi gerada para entrar com as propriedades térmicas do material (calor específico, densidade e condutividade térmica) e as condições de contorno (temperatura inicial do produto, perfil de temperatura da autoclave durante o processo, coeficiente global de transferência de calor). A FIGURA 17 apresenta uma representação feita pelo programa da aplicação das condições de contorno (temperatura e coeficiente convectivo) no modelo de elementos finitos bidimensional.

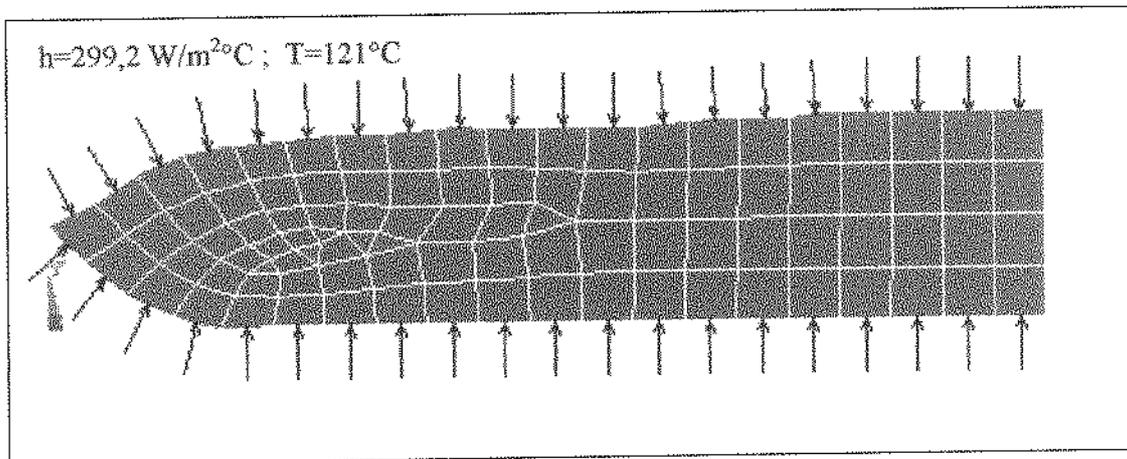


Figura 17: Representação Esquemática da Aplicação do Coeficiente Global de Transferência de Calor e Temperatura do Meio de Aquecimento no Modelo de Elementos Finitos.

Enquanto na maioria dos modelos a temperatura da autoclave é sempre considerada constante durante o período de aquecimento e de resfriamento, no presente trabalho utilizou-se os perfis reais de temperatura obtidos durante os processos. Três termopares foram instalados em diferentes posições da autoclave (nas bandejas imediatamente inferior e superior àquela contendo as bolsas e outro próximo ao topo do arranjo) e a média deles em função do tempo foi utilizada como temperatura do meio de aquecimento.

Três fases foram consideradas na etapa de aquecimento: 1) a temperatura inicial da autoclave após a transferência da água do tanque de estocagem para o tanque de trabalho; 2) temperatura do meio após 7 minutos de aquecimento (ponto mais alto) e 3) temperatura no final do tempo de aquecimento.

No tipo de autoclave utilizado, a pressão da entrada da água de resfriamento é a responsável pelo envio da água de aquecimento de volta ao tanque de estocagem. Isto permite que ocorra uma certa mistura no interior do equipamento, provocando um resfriamento mais lento. Considerar a temperatura da água como constante durante todo o processo de resfriamento, como na maioria dos casos, pode gerar erros na estimativa do perfil de temperatura do produto. A fase de resfriamento (20 minutos) foi então dividida em dez seções iguais gerando um perfil de temperaturas que foi utilizado no resfriamento.

A FIGURA 18 apresenta um exemplo de um perfil real de temperatura obtido na autoclave e o perfil que foi utilizado como condição de contorno no modelo.

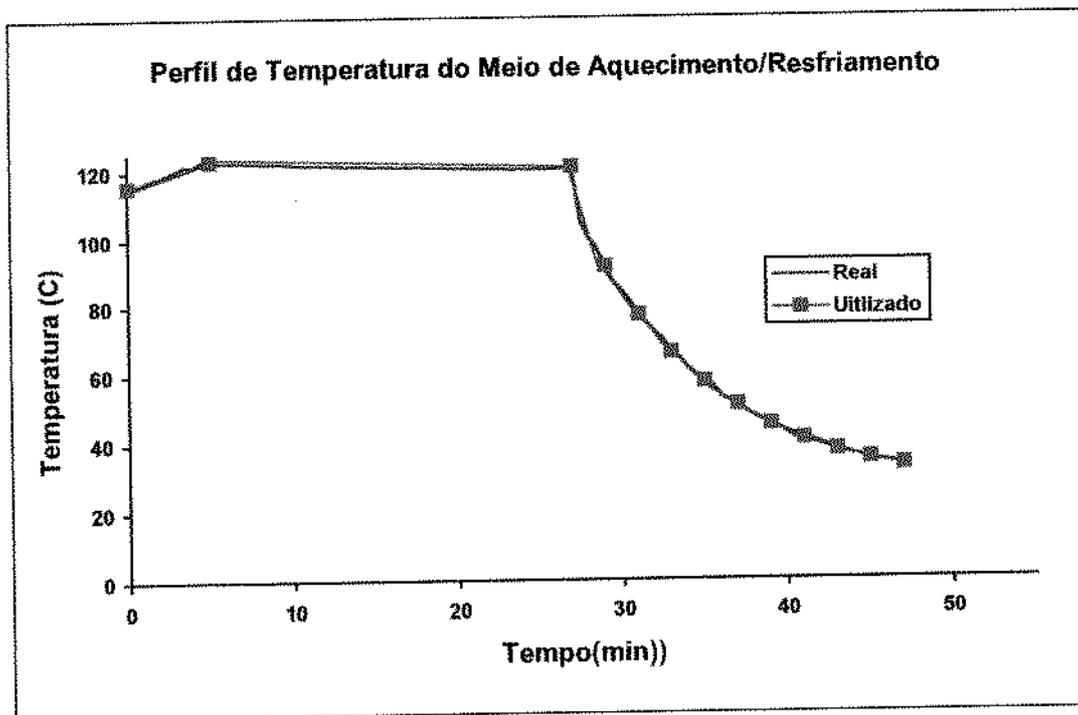


Figura 18: Perfil de Temperatura da Autoclave Comparado com o Utilizado no Modelo de Elementos Finitos

3.4.2 Fórmulas Empíricas

O modelo foi construído utilizando-se as fórmulas descritas por HAYAKAWA (1970) utilizando-se os parâmetros f_h , f_c , j_h e j_c obtidos no

ensaio de penetração de calor. A TABELA 6 apresenta as fórmulas descritas pelo referido autor que foram utilizadas no modelo.

Tabela 6 : Formulas Utilizadas no Modelo Empírico (HAYAKAWA, 1970)

<p>Porção Curvilínea Do Aquecimento</p>	$T_B - T = (T_B - T_0)^{\cot(Bt + \pi/4)}$ <p>para $0 \leq t \leq t_1$, onde:</p> $B = \frac{1}{t_1} \left\{ \arctan \left[\frac{\log_{10}(T_B - T_0)}{\log_{10} \{j_h (T_1 - T_0)\} - t_1/f_h} \right] - \pi/4 \right\}$ $t_1 = 0,9.f_h(1 - j_h)$
<p>Porção retilínea do aquecimento</p>	$T_B - T = j_h (T_B - T_0).10^{-t/t_h}$
<p>Porção Curvilínea Do Resfriamento</p>	$T - T_w = (T_g - T_w)^{\cos Bt}$ <p>para $0 \leq t \leq t_1$, onde:</p> $B = \frac{1}{t_1} \arccos \left[\frac{\log_{10} \{j_c (T_g - T_w)\} - t_1/f_c}{\log_{10}(T_g - T_w)} \right]$ $t_1 = 0,7.f_c(j_c - 1)$
<p>Porção Retilínea do Resfriamento</p>	$T - T_w = j_c (T_g - T_w).10^{-t/t_c}$

3.4.3 Solução Analítica

Um modelo tridimensional de transferência de calor foi construído aproximando a geometria da bolsa a uma placa plana de 170mm x 180mm x 190mm. Um programa foi construído em PASCAL para gerar

temperaturas utilizando a solução analítica para as equações de Fourier para transferência de calor por condução em uma placa plana infinita (equação 3.3.6.4).

Para um paralelepípedo com temperatura inicial constante, o adimensional de temperatura U pode ser obtido pela relação:

$$U = U_x U_y U_z \quad 3.4.3.1$$

onde U_x , U_y e U_z são os adimensionais de temperatura (equação 3.3.6.4) nas direções x, y e z, respectivamente.

3.5 Esterilização Média da Massa

O cálculo do valor de esterilização média da massa foi baseado no procedimento descrito por TEIXEIRA *et al.* (1969).

A equação que descreve processos de cinética de primeira ordem de destruição térmica de microrganismos pode ser escrita como:

$$\frac{-dC}{dt} = \frac{1}{D} C \quad 3.5.1$$

onde C representa a concentração de microrganismos e D o tempo de redução decimal. Rearranjando os termos e integrando para um intervalo pequeno intervalo de tempo, Δt , pode-se obter :

$$C^{(t+\Delta t)} = C^{(t)} 10^{\left(\frac{-\Delta t}{D}\right)} \quad 3.5.2$$

onde $C^{(t+\Delta t)}$ e $C^{(t)}$ representam a concentração de microrganismos nos tempos $(t+\Delta t)$ e t , respectivamente.

O valor de D é dependente da temperatura e pode ser descrito como:

$$\frac{-dD}{dT} = \frac{1}{z} D \quad 3.5.3$$

onde T é a temperatura e z a diferença de temperaturas que ocasiona uma mudança de 10 vezes no valor de D . Rearranjando os termos e integrando-se a equação 3.5.3 obtém-se:

$$D = D_r \cdot 10^{\left(\frac{T_r - T}{z}\right)} \quad 3.5.4$$

onde D_r é a taxa de redução decimal à temperatura de referência (121,1°C).

As equações 3.5.2 e 3.5.4 indicam que a concentração de microrganismos sobreviventes é dependente do tempo e temperatura do processo e, portanto, pode ser calculada para um determinado ponto num determinado instante. Uma vez conhecido o valor da temperatura em um dado ponto no interior do produto e considerando-a constante no pequeno intervalo de tempo Δt , o valor de D pôde ser calculado utilizando-se a equação 3.5.4. Um valor de D foi utilizado no início de cada intervalo de tempo da equação 3.5.2 e assumido como sendo constante naquele período. Desta maneira, considerando-se um ponto no interior do produto como o centro de um pequeno volume e uma vez conhecida a temperatura naquele ponto (temperatura média de cada elemento do modelo), a concentração de microrganismos pôde ser obtida e foi considerada representativa de um pequeno volume que o rodeia.

O modelo tridimensional de elementos finitos foi utilizado para estimar o valor de esterilização média da massa no processamento das bolsas, uma vez que o volume e a temperatura média de cada elemento ao longo do tempo eram conhecidos. Para o primeiro intervalo de tempo, a média da temperatura no centro de cada elemento (calculada como a média das temperaturas de cada nó que formavam o respectivo elemento) foi calculada para aquele intervalo de tempo e considerada constante. Este valor foi utilizado para calcular o valor de D para cada elemento pela equação 3.5.4, tendo como referência o valor de redução decimal do *C. botulinum* ($D_{121,1^\circ\text{C}}=0,21\text{min}$ e $z=10^\circ\text{C}$). Uma concentração inicial de microrganismos foi assumida no início do processo. A concentração de microrganismos no final do primeiro intervalo de tempo (foram utilizados

intervalos de $\Delta t=1\text{min}$) foi obtida pela equação 3.5.2. Esta nova concentração serviu como valor inicial para o próximo intervalo. Este procedimento se repetiu até o final do tempo de processo. Ao final do mesmo, a concentração de microrganismos em cada elemento foi multiplicada pelo volume do respectivo elemento, obtendo-se assim o número de sobreviventes no volume de cada elemento. Assim, o número total de sobreviventes no interior da bolsa foi obtido somando-se os de todos os elementos do modelo.

O valor de esterilização média da massa (F_m) foi calculado pela seguinte equação:

$$F_m = D_r \log\left(\frac{N_0}{N}\right) \quad 3.5.5$$

onde N_0 e N são o número de microrganismos inicial e final, respectivamente, na bolsa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do Produto

4.1.1 Composição Centesimal

O lote de produto que foi utilizado em todos os experimentos apresentou a seguinte composição centesimal: 68% de umidade, 30,2% de proteínas, 0,8% de gordura, 1,3% de cinzas e 0,25% de cloretos. PEREZ-MARTIN *et al.* (1989) analisaram a composição centesimal de albacora (*Thunnus alalunga*) pré-cozido e encontraram os seguintes resultados: 61,9% de úmidade, 26,8% de proteínas, 9,3% de gordura e 3,1% de cinzas.

4.1.2 Carga Microbiana Inicial

Análises microbiológicas foram realizadas para se determinar a carga microbiana inicial. A contagem total de mesófilos em placas foi de $1,09 \times 10^5$ UFC/g e a de anaeróbios mesófilos esporulados foi <3 NMP/g.

O produto foi obtido junto a uma empresa de processamento de pescados situada aproximadamente a 200km de Campinas, já eviscerado, pré-cozido e ralado. Este processo de manuseio do produto pode ter influenciado a contagem alta de mesófilos encontrada. MOSSEL *et al.* (1995) analisaram a contaminação microbiológica de camarão pré-cozido e congelado e encontraram uma contagem de mesófilos de 10^5 UFC/g.

4.1.3 Propriedades Físicas do Produto

4.1.3.1 Calor Específico

A TABELA 7 apresenta os resultados do calor específico do atum em salmoura. Pelo menos cinco repetições para cada nível de adição de salmoura foram realizadas. Os valores de c_p apresentados representam uma média obtida entre 30 e 60°C. Os desvios padrões e, conseqüentemente, os coeficientes de variação encontrados foram

pequenos, indicando que o método do DSC para a determinação de c_p é bastante preciso.

A FIGURA 19 apresenta uma curva de c_p versus temperatura obtida por DSC.

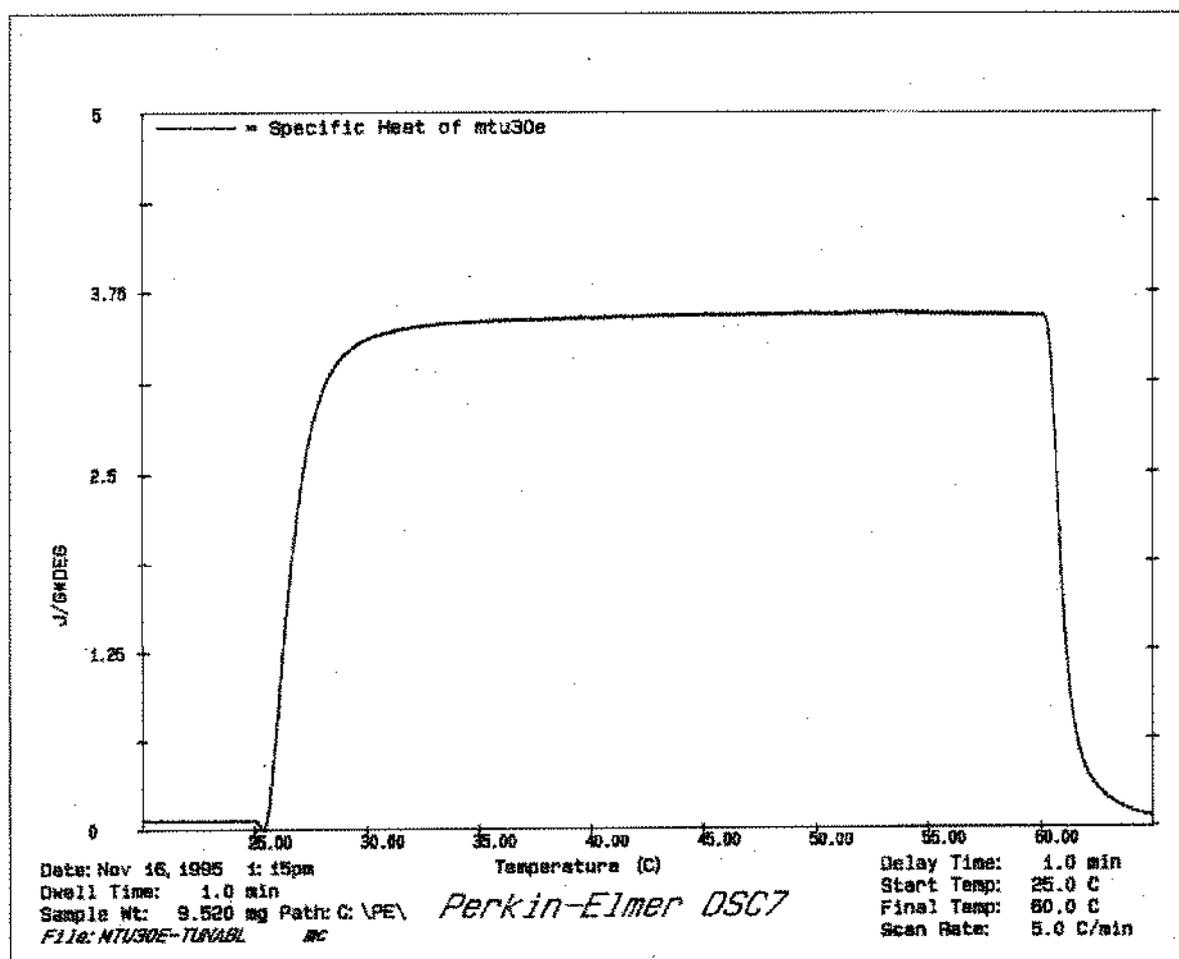


Figura 19 : Curva Característica do Calor Específico de Atum com 30% de Salmoura

Tabela 7 : Calor Específico de Atum em Salmoura

%Salmoura	Umidade (%)	c_p * (kJ/kg°C)	DP	%CV
0	68,1	3,3853	0,0358	1,06
10	70,9	3,4298	0,0385	1,12
20	74,0	3,5091	0,0370	1,06
25	75,8	3,5648	0,0267	0,75
30	77,3	3,5975	0,0355	0,99

* Média dos valores entre 30 e 60°C.

A FIGURA 20 apresenta um gráfico dos valores de c_p versus a umidade do produto. A equação 4.1.3.1.1 representa a regressão linear encontrada para os dados do calor específico versus a umidade do produto. Esta relação condiz com a aquela publicada por DICKERSON (1969), a qual foi desenvolvida para produtos cárneos com umidade superior a 26% e sucos de frutas com umidade acima de 50%.

$$c_p = 0,0239W + 1,7485 \quad 4.1.3.1.1$$

onde c_p é o calor específico (kJ/kg°C) e W a umidade (%).

SINGH (1993) apresenta um valor de calor específico para peixes (80% de umidade) de 3,600 kJ/kg.K. Pela fórmula de DICKERSON acima descrita obtemos 3,684 kJ/kg.K e pela regressão encontrada neste trabalho temos 3,661 kJ/kg.K.

Os valores da TABELA 7 encontram-se de acordo com aqueles encontrados por PEREZ-MARTIN *et al.* (1989) que determinaram o calor específico de albacora (67,3% de umidade) utilizando um microcalorímetro e encontraram um valor de 3,09 kJ/kg K a uma temperatura de 25°C.

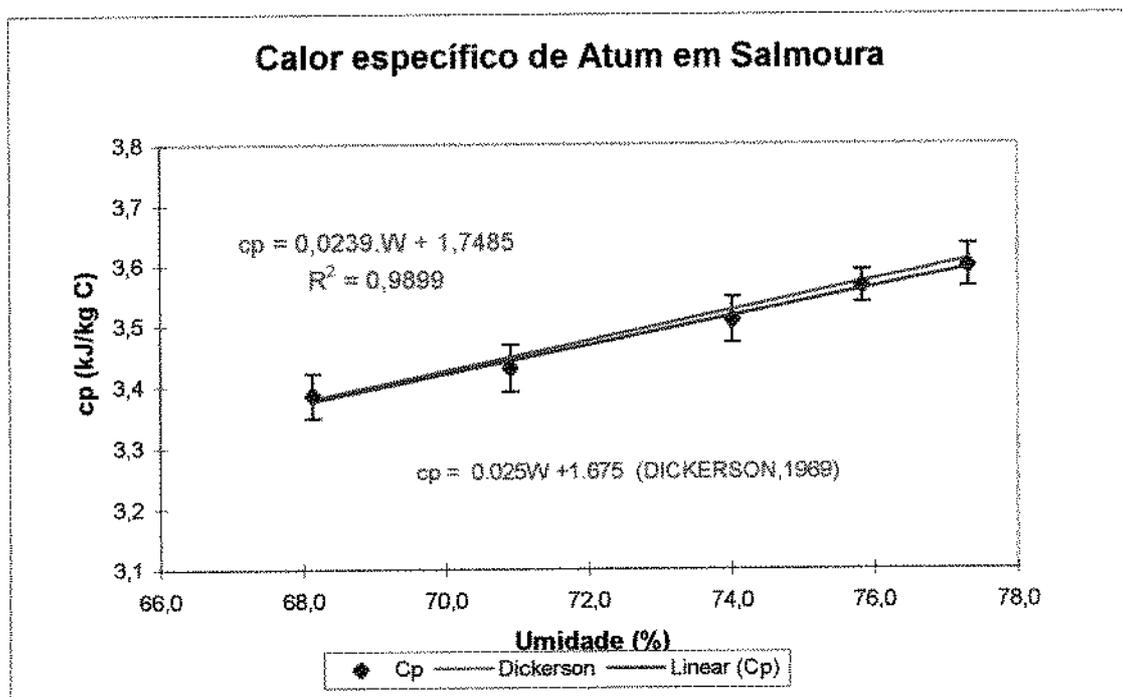


Figura 20 : Regressão Linear do Calor específico x Umidade de Atum em Salmoura

4.1.3.2 Condutividade Térmica

As FIGURAS 21 e 22 representam o perfil de temperatura do produto durante a determinação da condutividade térmica pelo uso do sensor e a respectiva curva encontrada após a transformação de eixos ($\ln(t)$ vs T), respectivamente. O coeficiente angular obtido na regressão é utilizado na equação 3.1.3.2.2.1 para o cálculo da condutividade térmica pelo método do sensor.

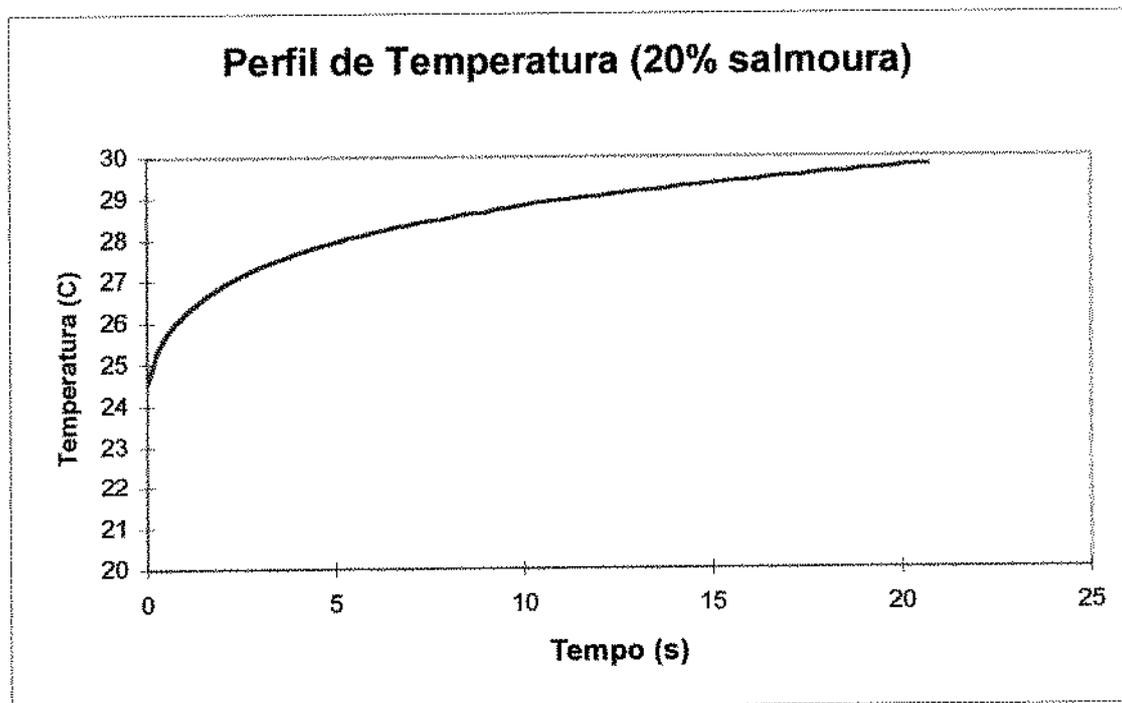


Figura 21 : Curva de Aquecimento Típica Durante a Determinação da Condutividade Térmica

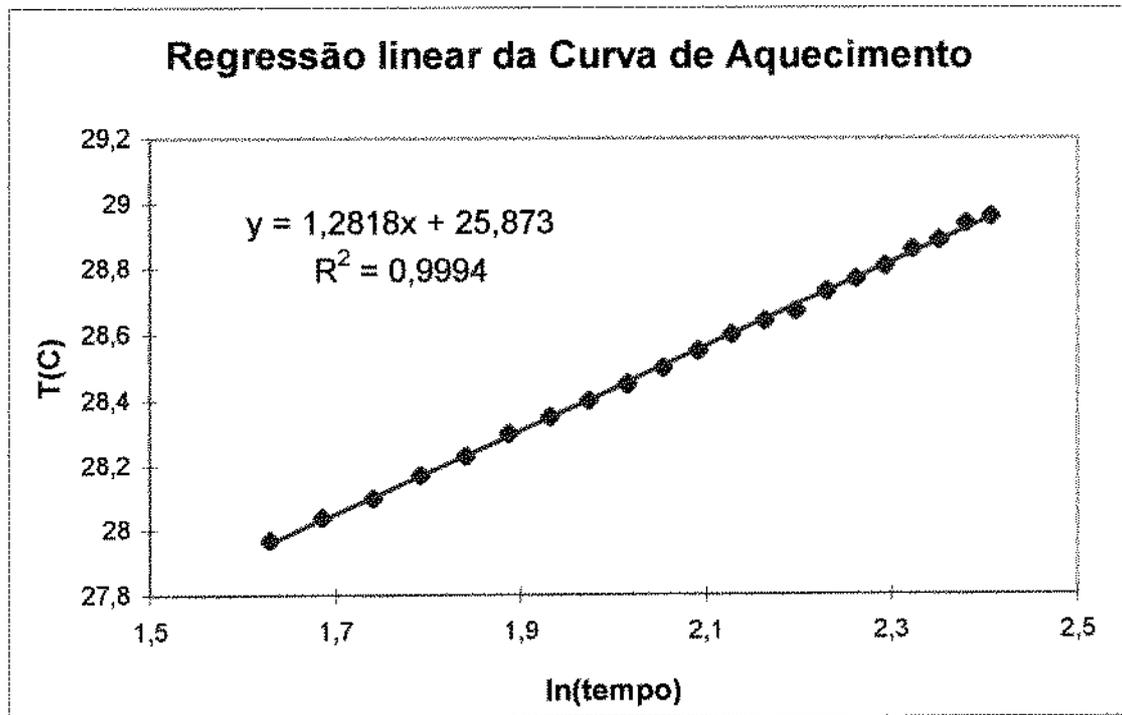


Figura 22 : Linearização da Curva de Aquecimento (ln(t) x T)

A TABELA 8 apresenta os resultados da condutividade térmica obtidos pelo método da sonda linear e pelo DSC. Os métodos apresentaram resultados semelhantes, no entanto, o método da sonda mostrou-se mais prático, rápido e preciso (menores coeficientes de variação).

Tabela 8 : Condutividade Térmica de Atum em Salmoura pelo Método da Sonda Linear e pelo DSC (W/m°C)

	0% Salmoura		10% Salmoura		20% Salmoura		25% Salmoura		30% Salmoura	
	Sonda	DSC	Sonda	DSC	Sonda	DSC	Sonda	DSC	Sonda	DSC
W (%)	68,0	67,5	71,5	70,6	74,71	74,2	75,4	76,1	76,9	77,3
Media	0,434	0,433	0,473	0,456	0,493	0,485	0,508	0,499	0,525	0,521
DP	0,015	0,078	0,012	0,084	0,012	0,063	0,009	0,033	0,011	0,022
CV(%)	3,45	18,0	2,46	18,3	2,38	12,9	1,76	6,5	2,18	4,2

W : umidade; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação. (*) Valores obtidos entre 25 a 35°C.

A FIGURA 23 apresenta os valores das condutividades obtidas pelo método da sonda e a reta obtida por regressão linear contra a porcentagem de umidade dos produtos. Pode-se observar uma alta correlação entre os dados, apontando ser a regressão linear um bom modelo para o sistema.

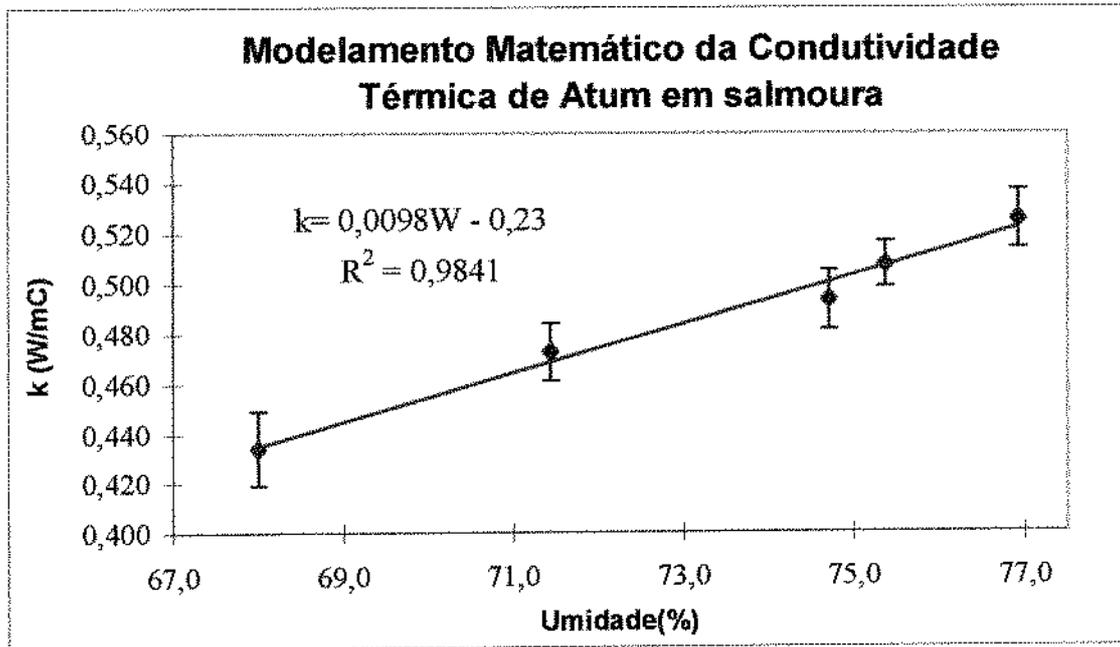


Figura 23 : Valores de Condutividade Térmica de Atum em Salmoura versus Umidade (%) pelo Método da Sonda Linear. A Curva Cheia Representa a Reta Obtida por Regressão Linear.

A equação 4.1.3.2 representa o modelo obtido para a condutividade térmica de atum em salmoura em função da umidade do produto (68 a 76,9%).

$$k = 0,0098W - 0,23 \quad 4.1.3.2$$

onde k é a condutividade térmica ($W/m^{\circ}C$) e W a umidade (%).

SWEAT (1975) apresenta uma fórmula para o cálculo da condutividade térmica de produtos cárneos (incluindo aves e peixes) baseado na umidade dos produtos. A relação foi obtida através de uma coletânea de dados da literatura. Os resultados obtidos pelos dois métodos estão em acordo com a referida fórmula, considerando os limites apontados pelo autor(15%). PEREZ-MARTIN *et al.* (1989) determinaram condutividade térmica de albacora (67,3% de umidade) utilizando uma sonda com fonte de calor e encontraram valores de 0,493 e 0,567 $W/m^{\circ}C$ (15-20 $^{\circ}C$), para fluxo de calor perpendicular e paralelo às fibras, respectivamente.

Considerando que o método da sonda mostrou-se mais preciso que o método do DSC, optou-se pelo uso da equação 4.1.3.2 como modelo a ser utilizado para o cálculo da condutividade térmica do produto.

4.1.3.3 Densidade

As determinações de densidade foram realizadas obtendo-se a massa do produto acondicionada no recipiente utilizado para as medidas de condutividade térmica pelo método da sonda linear (item 3.1.3.2.2) mostrado na figura 5, cujo volume é conhecido.

A TABELA 9 apresenta os valores de densidade do atum em diferentes níveis de adição de salmoura. Os dados obtidos apresentam desvios padrão baixos, e conseqüentemente, baixos coeficientes de variação.

Tabela 9 : Densidade de Atum em Salmoura (kg/m^3)

	0%	10%	20%	25%	30%
	Salmoura	Salmoura	salmoura	Salmoura	Salmoura
Umidade (%)	68,0	71,4	74,7	75,4	76,9
1	1014,9	1017,0	1044,0	1056,2	1059,6
2	1015,9	1016,8	1046,8	1048,2	1064,1
3	1002,0	1032,2	1043,9	1047,6	1063,1
4	1011,1	1028,8	1041,2	1045,9	1059,6
5	1000,7	1027,6	1043,4	1052,2	1062,5
Média	1008,9	1024,5	1043,9	1050,0	1061,8
Desvio Padrão	7,2	7,1	3,0	4,1	2,0
CV (%)	0,71	0,70	0,29	0,40	0,19

RAHMAN & DRISCOLL (1994) analisaram a densidade de uma ampla variedade de pescados e encontraram valores médios para peixe fresco na faixa de 901 a 1100 kg/m^3 . PEREZ-MARTIN *et al.* (1989) assumiram um valor de 1080 kg/m^3 para densidade de albacora no cálculo de difusividade térmica do referido produto.

A FIGURA 24 apresenta um gráfico da regressão linear da densidade versus a umidade do produto.

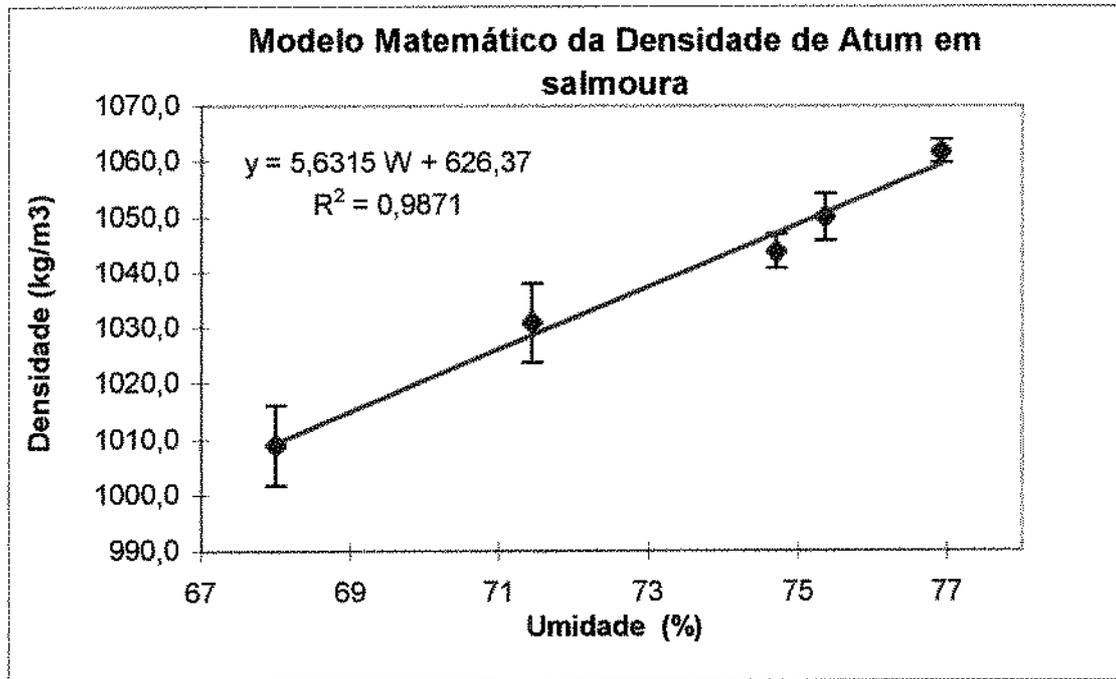


Figura 24: Regressão Linear dos Valores de Densidade de Atum em Salmoura versus Umidade.

A equação 4.1.3.3. apresenta o modelo obtido para a densidade de atum em salmoura em função da umidade do produto.

$$\rho = 5,6315W + 626,37 \quad 4.1.3.3.$$

onde ρ é a densidade (kg/m³) e W a umidade (%).

4.1.3.4 Difusividade Térmica

A TABELA 10 apresenta os valores de difusividade térmica de atum, considerando diferentes níveis de adição de salmoura que acarretariam em diferentes umidades no produto final. As difusividades foram calculadas através da relação $\alpha = k/\rho c_p$, onde a condutividade térmica, a densidade e o calor específico foram obtidos através das relações 4.1.3.2, 4.1.3.3 e 4.1.3.1.1, respectivamente.

Tabela 10 : Difusividade Térmica de Atum em Salmoura

Umidade (%)	k W/m°C	c _p kJ/kg°C	ρ kg/m ³	Difusividade m ² /s
68,0	0,436	3,373	1009,3	1,28E-07
71,2	0,468	3,450	1027,3	1,32E-07
74,4	0,499	3,527	1045,4	1,35E-07
76,0	0,515	3,565	1054,4	1,37E-07
77,6	0,530	3,603	1063,4	1,38E-07

BANGA *at al.* (1993) encontrou um valor de $1,29 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para a difusividade térmica de atum em óleo comestível usando minimização da diferença entre as temperaturas experimentais e calculadas pela solução das equações de Fourier, durante o processamento térmico do produto.

A FIGURA 25 apresenta o modelo obtido através de uma regressão linear para o cálculo da difusividade térmica de atum em salmoura baseado na umidade do produto.

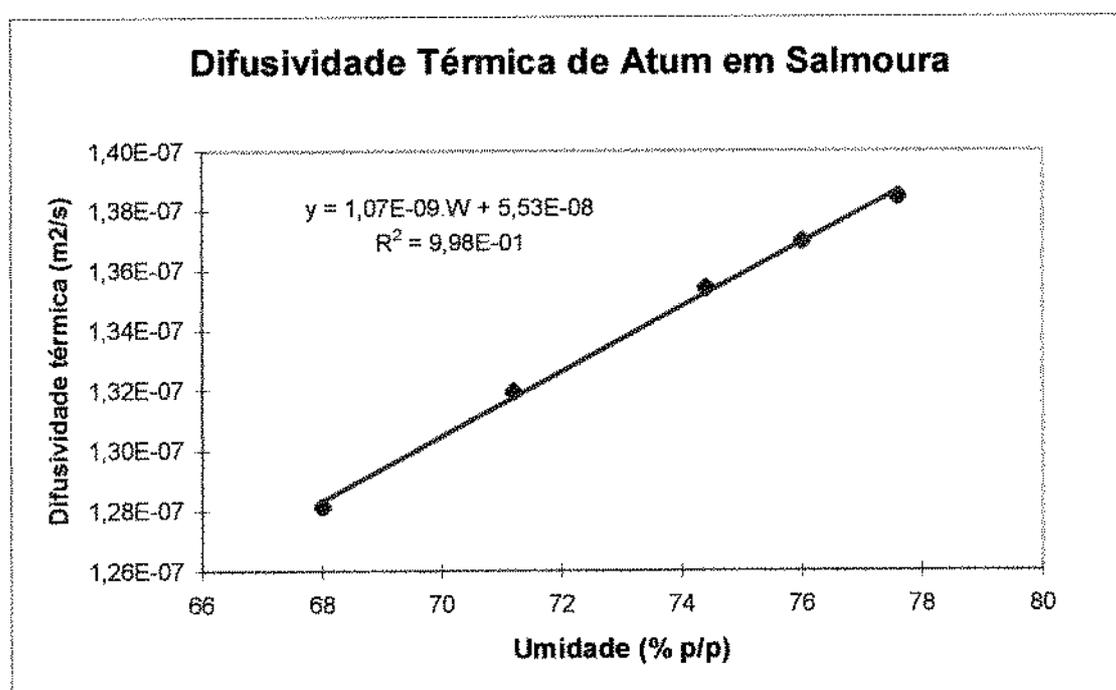


Figura 25 : Difusividade Térmica de Atum em Salmoura. A Curva Cheia Representa a Reta Obtida pela Regressão linear.

4.2 Embalagem

4.2.1 Avaliação Visual da Área de Soldagem

Uma condição excelente de fechamento das bolsas foi obtida com um tempo de solda de 5,7 segundos (escala 4 na seladora). Dez bolsas foram fechadas e classificadas como grau 1 (G1) (OLIVEIRA & ALVES, 1992) quanto a avaliação visual da área de soldagem, não apresentando bolhas ou enrugamento pelo calor.

A solda apresentou-se perfeita e não houve nenhum problema de vazamento durante os processamentos.

4.2.2 Determinação do Volume de Ar Residual

O máximo de vácuo que pôde ser aplicado foi o correspondente a 700mmHg (escala 4,5) no manômetro da seladora. Valores maiores que este arrastavam produto para fora da embalagem ou para a área de solda, causando defeitos na mesma.

Uma vez estabelecidas as condições de selagem, um ensaio com dez embalagens foi realizado a temperatura ambiente para se verificar o volume de ar residual no interior das mesmas. A média encontrada foi de 1ml de ar residual por embalagem, com desvio padrão de 0,1ml. Esta média pode ser considerada bastante satisfatória uma vez que volumes de até 5ml não provocam deformação em bolsas processadas com 147kPa de sobrepressão (ANÔNIMO, 1990). A TABELA 11 apresenta os valores de ar residual em dez embalagens com a média e desvio padrão.

CARVALHO (1996) obteve volumes médios de ar residual de 2,4ml por bolsa (130 x 170mm) destinadas a processamento de purê de banana. O autor considerou este volume satisfatório, não apresentando problemas nos ensaios de penetração de calor.

Tabela 11 : Volume de Ar Residual nas Bolsas Aplicando-se um Vácuo de 700mmHg.

	Produto (g)	Ar Residual (ml)
1	500,5	1,0
2	500,2	1,2
3	501,4	0,8
4	500,8	1,1
5	500,6	1,0
6	500,3	0,8
7	500,9	1,1
8	500,6	1,3
9	501,4	1,0
10	500,6	1,1
Média	500,8	1,0
D. Padrão	0,4	0,1

4.3 Equipamentos e Processos

4.3.1 Distribuição de Temperaturas na Autoclave

Devido ao fato da autoclave ter sido adaptada para o processamento de bolsas, houve a necessidade de avaliar se o novo arranjo com bandejas e espaçadores poderia alterar a distribuição de temperaturas no interior do equipamento.

Segundo as recomendações do NFPA (*National Food Processor Association, USA*), após um minuto atingida a temperatura de processo, a diferença máxima de temperaturas entre quaisquer pontos dentro de uma autoclave não deve ser superior a 1,7°C e devem estar em uma faixa de no máximo 0,9°C da temperatura de referência (citado por RAMASWAMY *et al*, 1991).

A TABELA 12 apresenta um resumo dos resultados obtidos para a avaliação do efeito do espaçamento entre as bandejas na distribuição de temperaturas.

Tabela 12 : Parâmetros Comparativos entre Arranjos de 4 Blocos (8cm) e 7 Blocos (4cm)

PARÂMETROS COMPARATIVOS	4 BLOCOS (8cm)	7 BLOCOS (4cm)
Temperatura Média da Autoclave	121,5°C	121,4°C
Desvio Padrão entre Médias	0,07°C	0,07°C
Diferença entre Média da Autoclave e MIG	0,8°C	0,8°C
Diferença Máxima entre Dois Pontos	0,2°C	0,2°C
Pontos de Aquecimento mais Lento	B2FM, B2FD, B4C	B1FD, B1C
Média das Posições mais Fria	121,4°C	121,3°C

FM=frente/meio; FD=frente/direita e C=centro

As FIGURAS 26 e 27 apresentam as médias de temperaturas por posição do arranjo contendo quatro blocos e sete blocos, respectivamente.

Pode-se observar pelos resultados da TABELA 12 e FIGURAS 26 e 27 que tanto o arranjo de quatro como o de sete blocos proporcionam boa distribuição de temperaturas no interior da autoclave, sendo a maior diferença de temperaturas encontradas de 0,2°C entre dois pontos quaisquer. Sendo assim, decidiu-se optar pelo processo com sete blocos pois o mesmo proporciona a utilização de um maior número de bolsas.

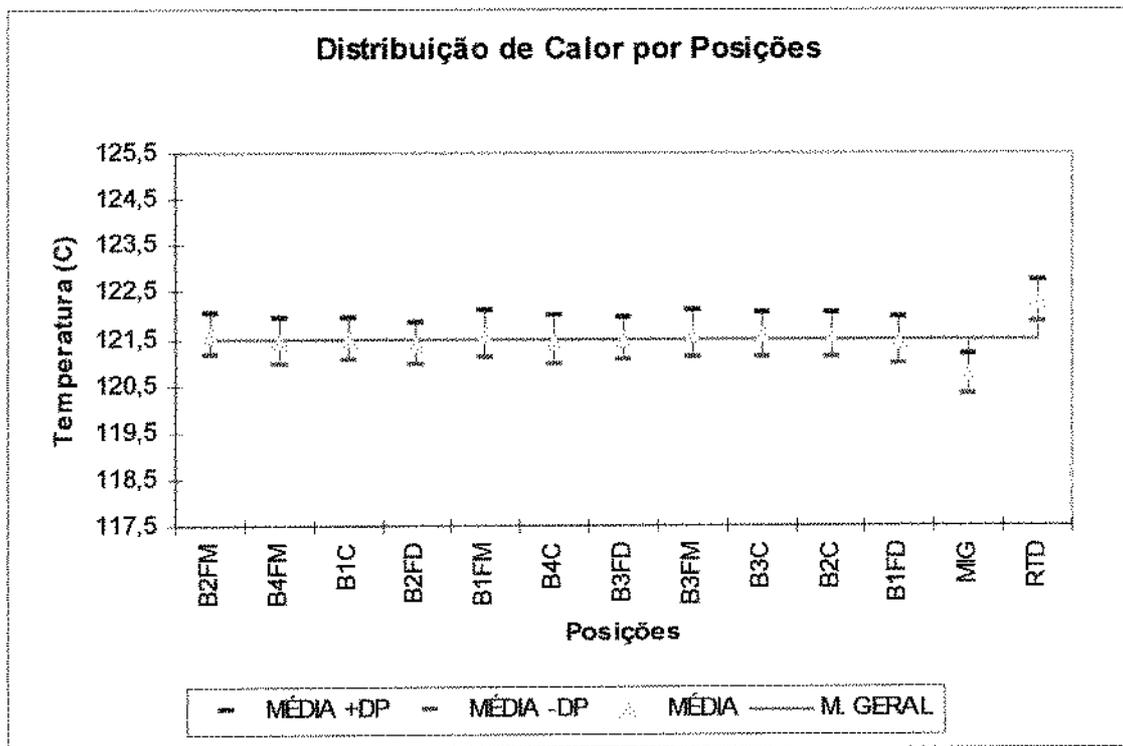


Figura 26 : Médias de Temperaturas em Diferentes Posições no Arranjo de Quatro Blocos (espaçamento de 8cm).

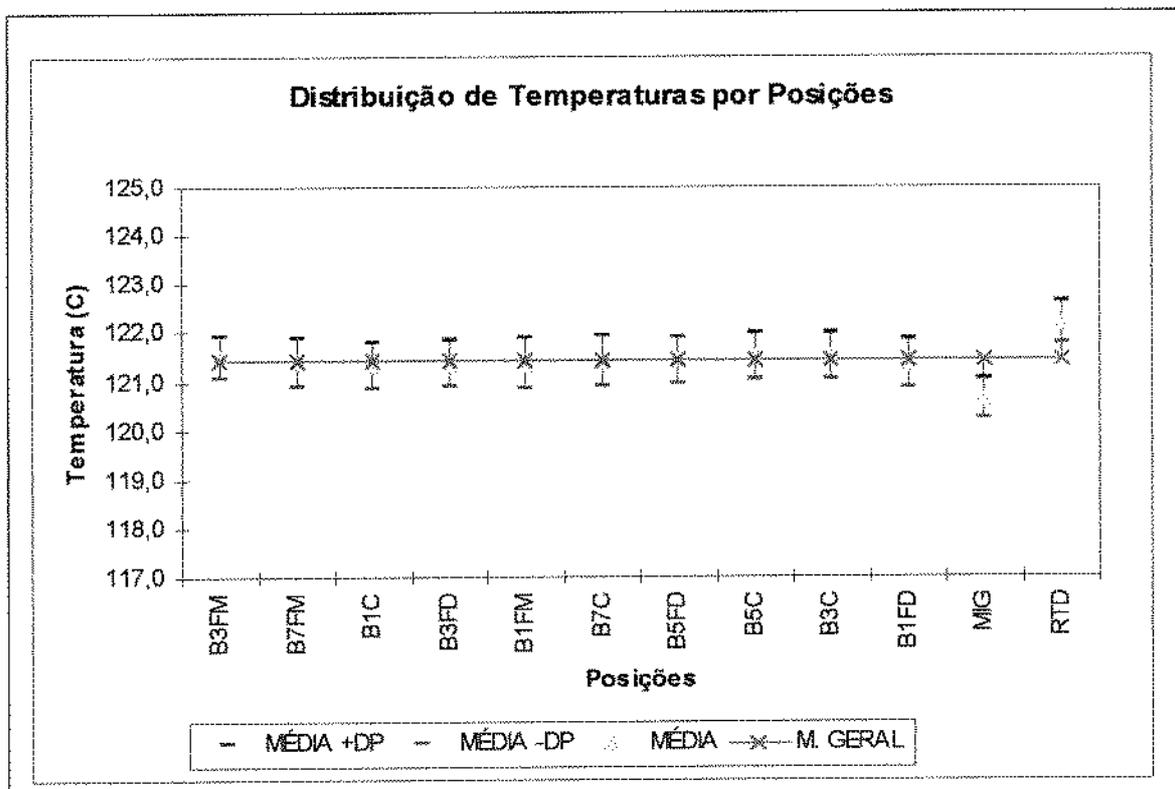


Figura 27 : Médias das Temperaturas em Diferentes Posições no Arranjo de Sete Blocos (espaçamento de 4cm).

Com o objetivo de avaliar a influência da temperatura de processo na distribuição de calor no interior da autoclave, optou-se por utilizar as temperaturas de 115°C e 121°C, parâmetros estes normalmente utilizados no processamento de atum industrialmente. Dois ensaios foram realizados para cada temperatura de processo, avaliando-se comparativamente, diferentes posições da autoclave. Nos primeiros ensaios estudou-se as temperaturas nas posições FD, FM e C. Posteriormente, foram estudadas as posições FD, C e FU.

As TABELAS 13 e 14 apresentam os resultados comparativos entre os ensaios de distribuição realizados à temperatura de 115°C e 121°C.

Tabela 13 : Comparativos entre Distribuição de Temperaturas na Autoclave Utilizando-se 115°C e 121°C para Posições FD, FM e C.

PARÂMETROS COMPARATIVOS	TEMPERATURA DE PROCESSO 115°C	TEMPERATURA DE PROCESSO 121°C
Temperatura Média da Autoclave	115,1°C	121,4°C
Desvio Padrão entre Médias	0,08°C	0,07°C
Diferença entre Média da autoclave e MIG	0,5°C	0,8°C
Diferença Máxima entre Dois Pontos	0,3°C	0,2°C
Pontos de Aquecimento mais Lento	B3FD	B1FD, B1C
Média das Posições mais Fria	114,9°C	121,3°C

FM=frente/meio; FD=frente/direita e C=centro

As FIGURAS 28 e 29 apresentam as médias de temperaturas por posições para os ensaios a temperaturas de processo de 115°C e 121°C.

Analisando-se as TABELAS 13 e 14, bem como as FIGURAS 28 e 29, pode-se observar que a diferença máxima de temperatura encontrada entre dois pontos distintos dentro da autoclave não foi superior a 0,4°C. Isto significa que a autoclave encontra-se dentro das recomendações estabelecidas pelo NFPA que estabelece um limite superior de 1,7°C

(citado por RAMASWAMY *et al.*, 1991). Ainda, não houve posição com diferença de temperatura superior a 0,9°C em relação a temperatura de referência .

Tabela 14 : Comparativos entre Distribuição de Temperaturas na Autoclave Utilizando-se 115°C e 121°C para Posições FD, C e .FU.

PARÂMETROS COMPARATIVOS	TEMPERATURA DE PROCESSO 115°C	TEMPERATURA DE PROCESSO 121°C
Temperatura Média da Autoclave	115,4°C	121,1°C
Desvio Padrão entre Médias	0,10°C	0,09°C
Diferença entre Média da Autoclave e MIG	0,6°C	0,7°C
Diferença Máxima entre dois Pontos	0,4°C	0,3°C
Pontos de Aquecimento mais Lento	B3FD	B3FD, B5C
Média das Posições mais Fria	115,1°C	121,0°C

FM=frente/meio; FD=frente/direita e C=centro

Embora as diferenças de temperaturas entre as diversas posições fossem bastante pequenas (máximo de 0,4°C), pode-se observar que existe um tendência a pontos de aquecimento mais lentos no bloco 3 na posição FD.

Pode-se observar pelas FIGURAS 28 e 29 que as temperaturas registradas pelo RTD foram sempre superiores às temperaturas medidas pelos termopares. Este fato pode ser explicado devido a localização deste dispositivo ser próxima a válvula de injeção de vapor. Fato inverso ocorre com o MIG, o qual registra temperaturas inferiores a média da autoclave por estar localizado na porção inferior externa do tanque de trabalho (água de saída para a bomba de recirculação).

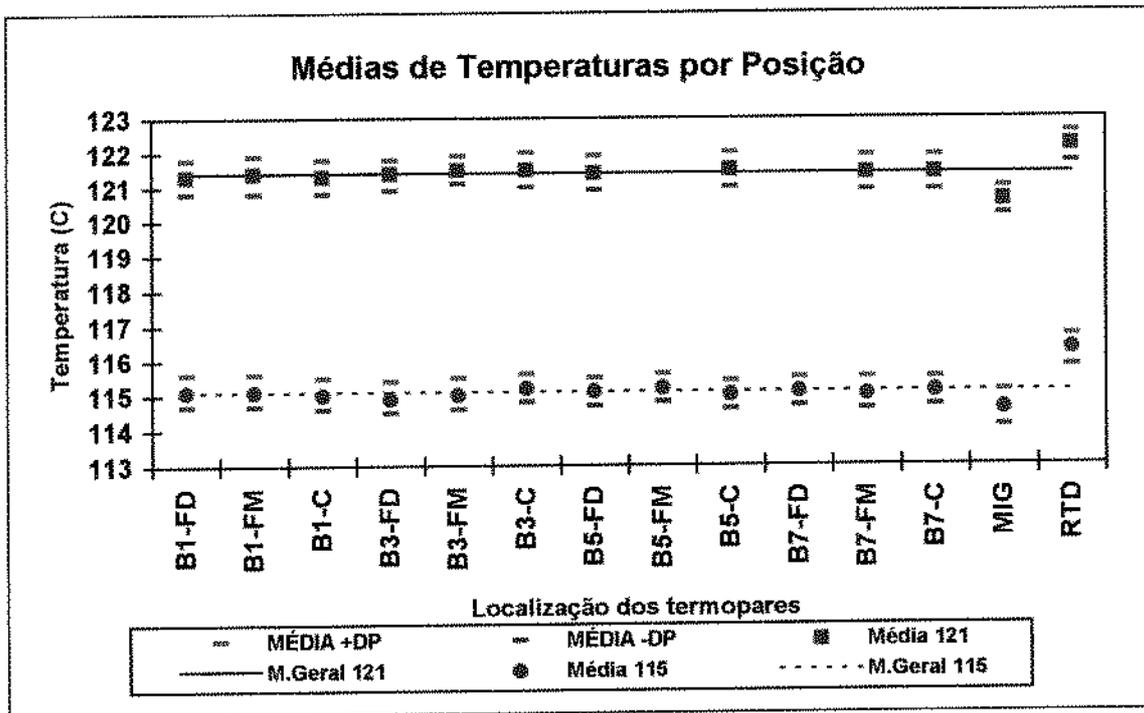


Figura 28 : Média de Temperaturas por Posição (Posições FD, FM e C)

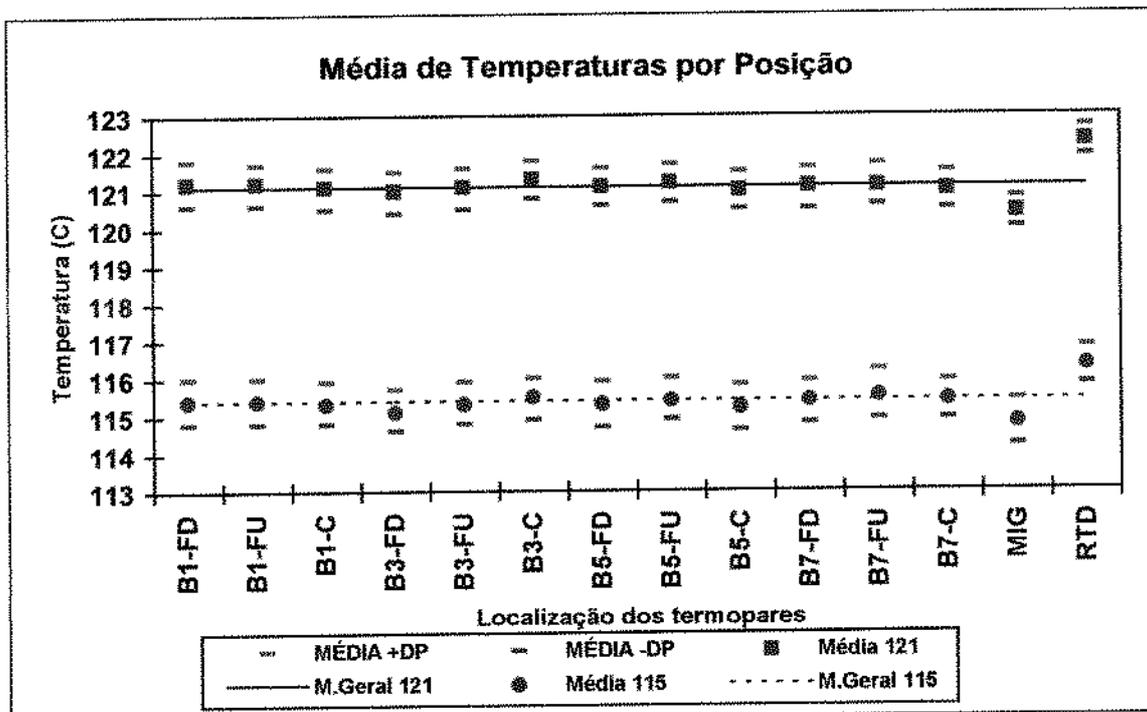


Figura 29 : Média de Temperaturas por Posição (Posições FD, C e FU)

4.3.2 Penetração de Calor nas Bolsas

O ensaio de penetração de calor permitiu determinar as taxas de aquecimento e resfriamento (f_h e f_c , respectivamente), bem como os fatores de atraso (j_h e j_c) do produto. Estes valores foram necessários para o cálculo do tempo de processo para atingir o valor de F_0 estipulado (7min), além de serem também parâmetros de entrada nos modelos empíricos de HAYAKAWA (1970), para simulação do processamento térmico das bolsas.

As TABELAS 15 e 16 apresentam os valores de penetração de calor nas bolsas do primeiro e do segundo ensaio, respectivamente. Observa-se nas referidas tabelas que os valores de f_c são praticamente o dobro que os de f_h , indicando um resfriamento deficiente para este tipo de equipamento. Este fato pode ser explicado pela demora no transporte da água quente de volta para o tanque de estocagem, provocando muita mistura da água de resfriamento com o meio de aquecimento. Por outro lado, não foi possível aumentar a velocidade do retorno da água de aquecimento para o tanque de estocagem pois ocorreram picos de pressão que poderiam prejudicar a integridade das embalagens.

CARDELLI (1992) encontrou valores de f_h de 8,4min e f_c de 12,3min no processamento de bolsas de 130x170mm de tamanho, contendo suspensão de bentonita a 10% e processadas em uma autoclave vertical Dixie modificada para o processamento de bolsas. CARVALHO (1996) encontrou valores de f_h entre 6,6 e 7,0min e f_c entre 14,5 e 19,6min no processamento de bolsas de 130x170mm de tamanho contendo purê de banana processadas em uma autoclave ALLPAX. Pode-se observar que os resultados encontrados pelos dois autores também apresentam valores de f_c bastante superiores aos de f_h .

Quanto às taxas de atraso, CARVALHO (1996) encontrou valores de j_h entre 0,33 e 0,54 e j_c entre 1,0 e 1,7 e CARDELLI (1992) valores de j_h de 1,22 e j_c de 1,5.

DURANCE & COLLINS (1991) processaram filés de salmão em bolsas e encontraram valores de f_h igual a 19,1 min e f_c de 16,4 min.

Tabela 15 : Resultados do Ensaio I de Penetração de Calor nas Bolsas

Bolsa	f_h (min)	j_h	f_c (min)	j_c
1	11,3	0,76	22,5	1,53
2	11,4	0,80	22,4	1,60
3	13,3	0,81	23,9	1,65
4	11,7	0,80	22,4	1,71
5	12,7	0,77	23,3	1,66
6	-	-	-	-
Media	12,1	0,79	22,9	1,63
D.Padrão	0,78	0,02	0,60	0,06
C.V. (%)	6,5	2,5	2,6	3,74

Tabela 16 : Resultados do Ensaio II de Penetração de Calor nas Bolsas

Bolsa	f_h (min)	j_h	f_c (min)	j_c
1	12,6	0,70	23,7	1,50
2	12,6	0,79	23,0	1,70
3	13,5	0,66	24,4	1,52
4	11,8	0,76	26,2	1,55
5	10,9	0,76	20,9	1,60
6	13,8	0,71	24,8	1,52
Média	12,5	0,73	23,8	1,57
D. Padrão	0,98	0,04	1,64	0,07
C.V.(%)	7,8	6,0	6,9	4,4

4.3.3 Determinação do Coeficiente Global de Transferência de Calor (h)

Para estimar o coeficiente convectivo de transferência de calor foram utilizadas as curvas de penetração de calor, e as respectivas taxas de aquecimento e resfriamento delas obtidas, para as seis bolsas do segundo ensaio (Tabela 16).

O programa desenvolvido para estimar o referido coeficiente, minimizava a inclinação da reta formada pela transformação axial dos valores de temperaturas medidas no centro das bolsas contra aqueles

obtidos pela resolução das equações de Fourier para transferência de calor em uma placa plana finita. O critério de parada utilizado foi o fato da inclinação calculada da reta estar próxima a unidade ($|s-1| < 0,0001$), onde 's' é a inclinação da reta, ou um número máximo de iterações igual a dez.

O coeficiente convectivo global de transferência de calor foi analisado em quatro fases distintas: 1) durante o tempo de subida (h_{cu}); 2) tempo de aquecimento (h_{aq}); 3) tempo de subida combinado com aquecimento (h_{cu+aq}); 4) tempo de resfriamento (h_{res}), semelhante ao procedimento utilizado por LEBOWITZ & BHOWMICK (1990).

A TABELA 17 apresenta os valores de h estimados pelo programa para cada uma das etapas acima descritas. A referida tabela mostra os valores da inclinação obtida em cada etapa e juntamente com o valor do coeficiente de correlação R^2 . Pode-se observar pelos resultados que as inclinações das retas estavam sempre bem próximas a 1 e que os coeficientes de correlação foram sempre maiores que 0.99.

A TABELA 18 apresenta a média dos valores de h obtidos para cada uma das fases e os respectivos desvios padrão e coeficientes de correlação. Uma análise de variância dos resultados da referida tabela indicou não haver diferença significativa (95% de confiança) entre as médias dos valores de h nas fases de subida, aquecimento e na combinação das duas últimas. Os resultados completos da análise de variância utilizando-se o SAS (Statistical Analysis Software) encontram-se no ANEXO I.

LEBOWITZ & BHOWMICK (1990) avaliaram o coeficiente global de transferência de calor em uma autoclave adaptada para processamento de bolsas de 2,5cm de espessura (laminado plástico/alumínio) com água e sobrepressão de ar. Os resultados encontrados pelos autores foram: $h_{cu} = 174 \pm 35$ ($W/m^2 K$); $h_{aq} = 243 \pm 117$ ($W/m^2 K$); $h_{cu+aq} = 186 \pm 54$ ($W/m^2 K$) e $h_{res} = 222 \pm 128$ ($W/m^2 K$) Os

autores não encontraram diferença significativa entre os valores de h para cada uma das fases analisadas.

Tabela 17 : Valores de h Obtidos para as Diferentes Fases do Processo

BOLSA		h (W/m ² K)	INCLINAÇÃO	R ²
Bolsa 1	h_{cu}	291.3	1.0000	0.9992
	h_{aq}	311.9	1.0000	0.9992
	h_{cu+aq}	309.8	1.0001	0.9996
	h_{res}	53	0.9986	0.9966
Bolsa 2	h_{cu}	206.0	1.0000	0.9983
	h_{aq}	258.0	0.9999	0.9999
	h_{cu+aq}	251.6	0.9999	0.9994
	h_{res}	45.7	1.0037	0.9918
Bolsa 3	h_{cu}	187.6	1.0000	0.9913
	h_{aq}	286.6	1.0001	0.9986
	h_{cu+aq}	272.4	1.0001	0.9993
	h_{res}	50.7	1.0000	0.9943
Bolsa 4	h_{cu}	289.4	0.9999	0.9997
	h_{aq}	331.9	1.0001	0.9991
	h_{cu+aq}	326.8	1.0000	0.9995
	h_{res}	38.6	0.9909	0.9942
Bolsa 5	h_{cu}	233.2	1.0009	0.9975
	h_{aq}	406.8	1.0001	0.9985
	h_{cu+aq}	375.5	1.0000	0.9989
	h_{res}	65.6	1.0007	0.9971
Bolsa 6	h_{cu}	327.9	0.9999	0.9975
	h_{aq}	252.4	1.0001	0.9999
	h_{cu+aq}	259.0	1.0000	0.9943
	h_{res}	48.2	0.9987	0.9954

Pode-se observar através da TABELA 18 que os valores de h para o resfriamento são muito menor que para as demais fases. Este fato pode ser explicado devido ao fato de que no início da fase de resfriamento existe uma mistura da água fria com a água quente nos primeiros minutos desta fase e o modelo de transferência de calor utilizado no programa considera constante a temperatura do meio de resfriamento (temperatura da água de entrada) ao longo do processo.

Tabela 18 : Valores Médios de h nas Fases de Subida, Aquecimento e Resfriamento

Bolsa	H _{cu}	H _{aq}	h _{cu+aq}	h _{res}
1	291,3	311,9	309,8	54,9
2	205,0	257,0	251,6	45,7
3	187,6	286,6	272,4	50,7
4	289,4	331,9	326,8	38,6
5	233,2	406,8	375,5	65,6
6	327,9	252,2	259,0	48,2
Média	255,7	307,7	299,2	50,6
D. Padrão	50,5	52,5	43,4	8,3
%CV	19,8	17,1	14,5	16,5

4.3.4 Ensaio de Processamento Térmico e Esterilidade Comercial

A TABELA 19 apresenta as condições de processamento utilizadas no ensaio de esterilidade comercial, incluindo o tempo de processo calculado pelo programa ESPERA.

As bolsas foram incubadas a 37°C por dez dias e não foram observadas quaisquer anormalidades ou estufamento durante este período.

Tabela 19 : Condições de Processamento Durante Ensaio de Esterilidade Comercial.

PARÂMETRO	CONDIÇÃO
Temperatura inicial do produto	25,2 °C
Temperatura de aquecimento	121,6 °C
Temperatura de resfriamento	24 °C
Tempo de aquecimento (min)	29 min
Tempo de resfriamento (min)	20 min
F _p	7,7 min ¹

¹ Valor médio calculado pelo Método Geral para duas bolsas

4.4 Modelamento Matemático do Perfil de Temperaturas na Bolsa

Nove experimentos foram realizados com o intuito de avaliar estatisticamente os resultados obtidos pelos quatro modelos estudados contra os valores reais de temperatura medidos no centro das bolsas. A cada processamento foram coletados o perfil de temperaturas das bolsas e da autoclave, juntamente com a umidade do produto (utilizada para estimar

a condutividade térmica, densidade e calor específico). Estes dados foram utilizados como entrada nos modelos.

A FIGURA 30 apresenta o perfil de temperaturas medidas no centro da bolsa contra aqueles gerados pelos quatro modelos.

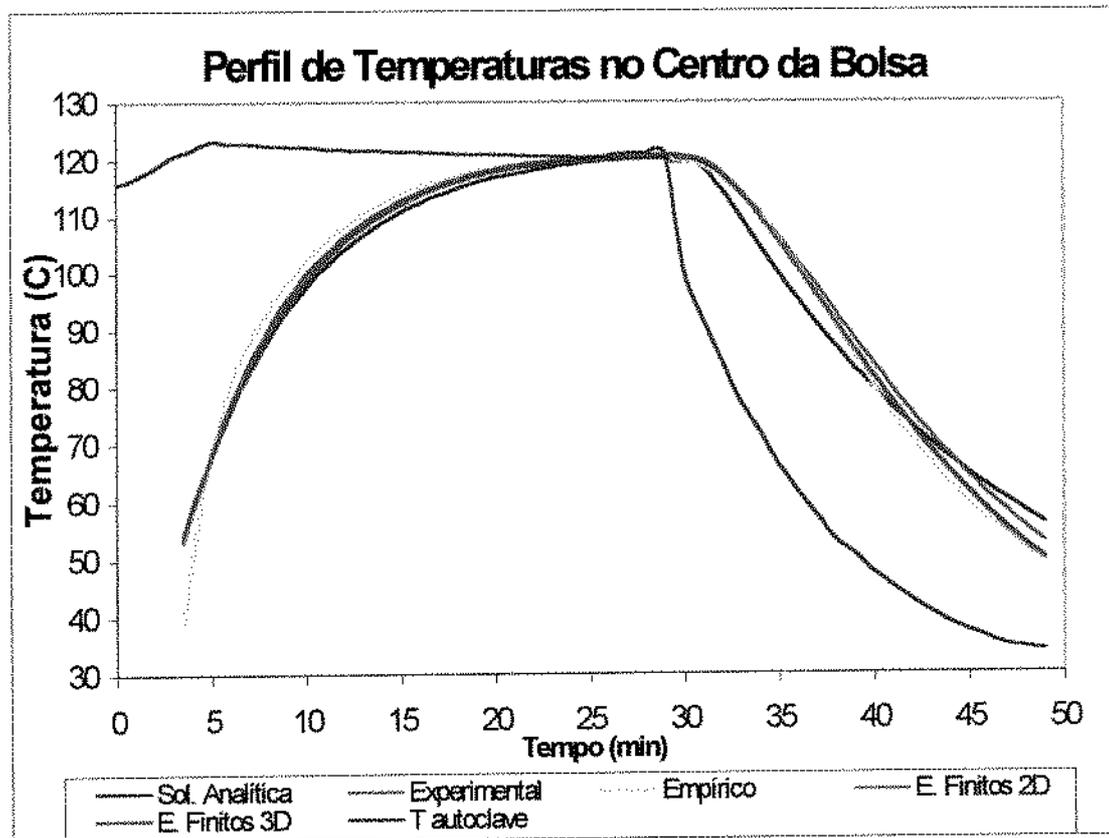


Figura 30 : Perfis de Temperaturas no Centro da Bolsa (Experimental x Modelos)

Os modelos de elementos finitos utilizaram como entrada o perfil real de temperatura obtido na autoclave (item 3.4.1.). No entanto, o modelo empírico (item 3.4.2) e o das soluções analíticas (item 3.4.3) utilizaram como temperatura de aquecimento a média obtida durante o processo de aquecimento, e como resfriamento, a temperatura da água de entrada na autoclave.

A comparação estatística entre modelos foi realizada apenas com os valores de temperatura estimados no centro das bolsas. Foram comparados, separadamente, os resultados do processo de aquecimento e de resfriamento.

Uma maneira utilizada para comparação entre os modelos foi realizar uma regressão linear entre os valores de temperaturas medidas experimentalmente no centro das bolsas e os valores estimados pelos modelos. A regressão linear foi forçada a passar pela origem. Desta maneira os valores das inclinações das retas puderam ser melhor comparados. Assim, quanto maior o coeficiente de correlação (R^2) da regressão e quanto mais próximo da unidade o coeficiente angular da reta, melhor o modelo.

Uma outra maneira para se avaliar a proximidade dos valores experimentais dos valores previstos pelos modelos é utilizar o teste de Qui-quadrado (χ^2). Este coeficiente expressa o módulo da somatória das diferenças ao quadrado entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo, conforme descrito na equação 4.4.1. Desta maneira, quanto menor o valor do χ^2 mais próximo o modelo estará dos valores experimentais.

$$\chi^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad 4.4.1$$

onde O_i são os valores observados experimentalmente e E_i são os estimados pelo modelo.

A TABELA 20 apresenta os valores de χ^2 , juntamente com os valores dos coeficientes angulares e de R^2 das regressões lineares obtidas para os quatro modelos nas fases de aquecimento e resfriamento.

Tabela 20 : Valores de Qui-quadrado (χ^2) e Coeficientes Angulares e de Correlação (R^2) Obtidos na Regressão Linear dos Valores de Temperaturas Experimentais Contra Aquelas Estimados pelos Modelos.

MODELO	FASE DE AQUECIMENTO			FASE DE RESFRIAMENTO		
	χ^2	Inclinação	R^2	χ^2	Inclinação	R^2
SOL. ANALÍTICA	23,01	1,0039	0,9997	159,00	0,9748	0,9965
E. FINITOS 2D	19,96	1,0030	0,9997	20,23	0,9856	0,9996
E. FINITOS 3D	13,90	0,9979	0,9998	19,80	0,9867	0,9995
EMPÍRICO	109,78	0,9829	0,9990	55,56	1,0086	0,9986

* Os resultados estatísticos foram obtidos com base em nove experimentos totalizando 477 leituras de temperatura na fase de aquecimento e 351 no resfriamento. Os resultados completos da análise de regressão utilizando SAS (Statistical Analysis Software) encontram-se nos ANEXOS II a IX.

Analisando-se os resultados da fase de aquecimento da tabela 20, pode-se observar que todos os modelos apresentaram coeficientes de correlação superiores a 0,99, sendo que os de elementos finitos apresentaram as melhores correlações. Os coeficientes angulares (inclinação) também estiveram todos bem próximos a unidade, no entanto, novamente, os modelos de elementos finitos estiveram mais próximos a 1. Ainda referente a mesma tabela, pode-se observar através dos resultados do teste Qui-quadrado obtidos para a fase de aquecimento que os modelos de elementos finitos foram os que estimaram valores de temperatura mais próximas daqueles obtidos experimentalmente, seguidos pelo modelo de soluções analíticas e das fórmulas empíricas.

Sendo assim, pode-se concluir que o modelo tridimensional de elementos finitos foi o que apresentou melhores resultados na fase de aquecimento, seguido pelo modelo bidimensional, o das soluções analíticas e finalmente o das fórmulas empíricas.

As FIGURAS de 31 a 34 apresentam os gráficos das regressões lineares dos valores de temperatura observados experimentalmente no centro das bolsas versus aqueles obtidos pelos modelos na fase de aquecimento.

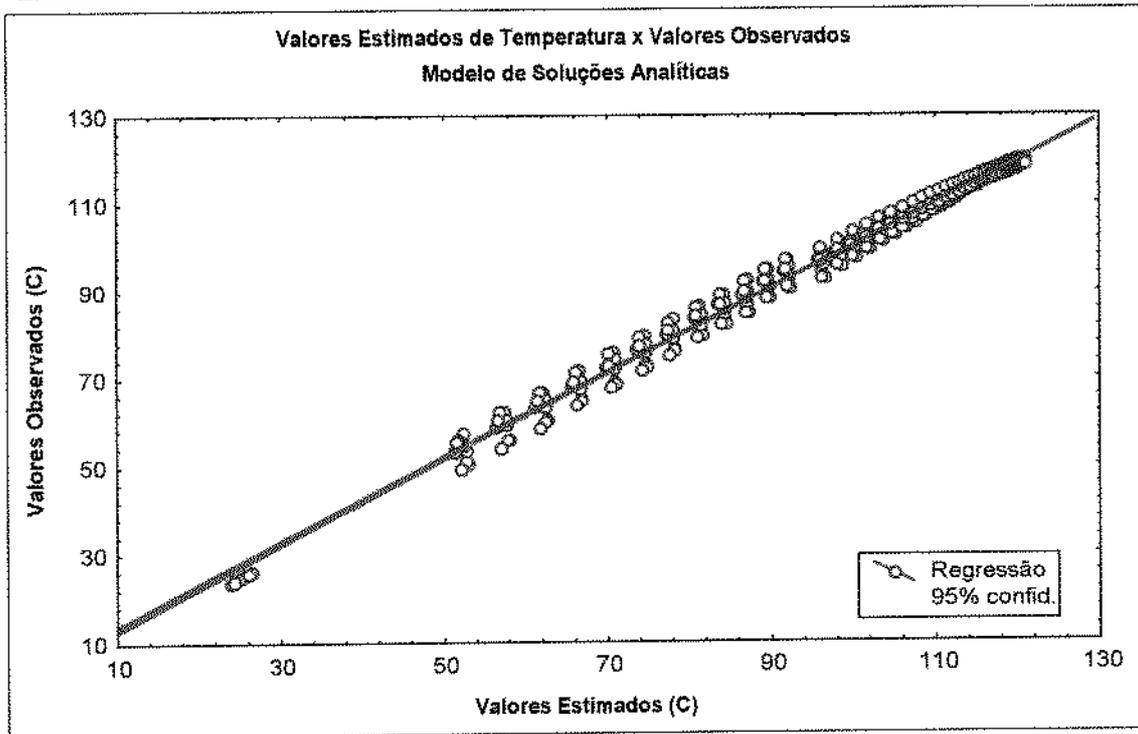


Figura 31: Regressão linear dos Valores Experimentais x Sol. Analítica (aquecimento)

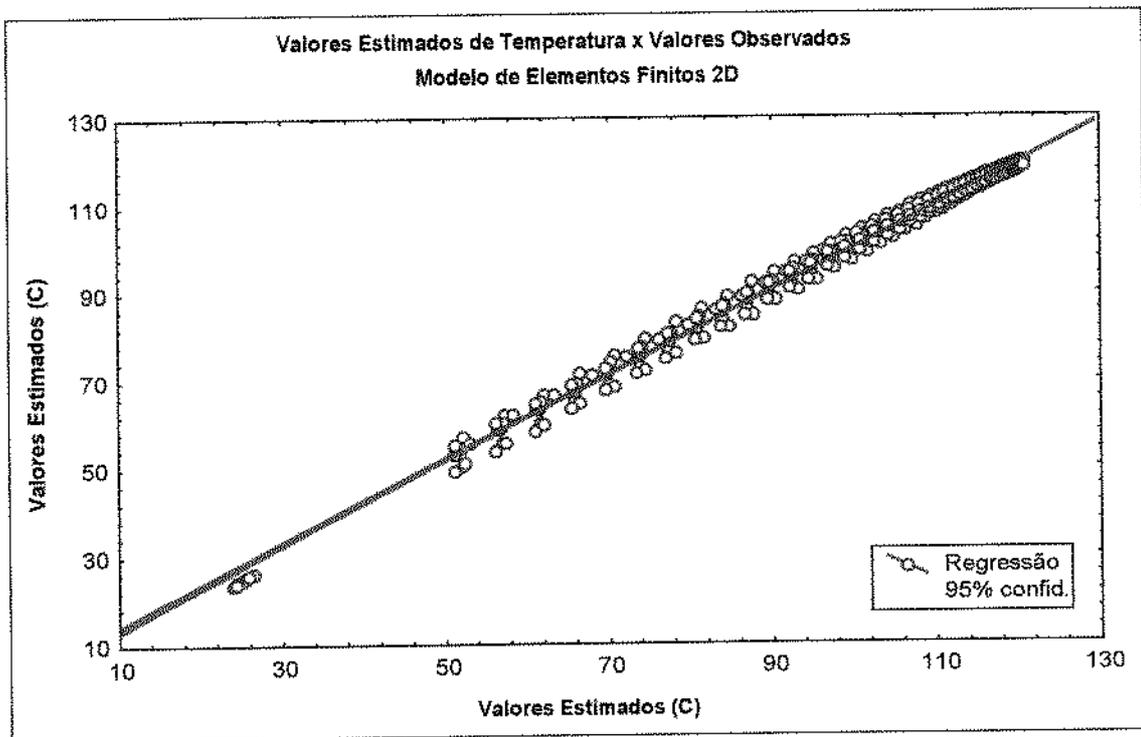


Figura 32: Regressão linear dos Valores Experimentais x E. Finitos 2D (aquecimento)

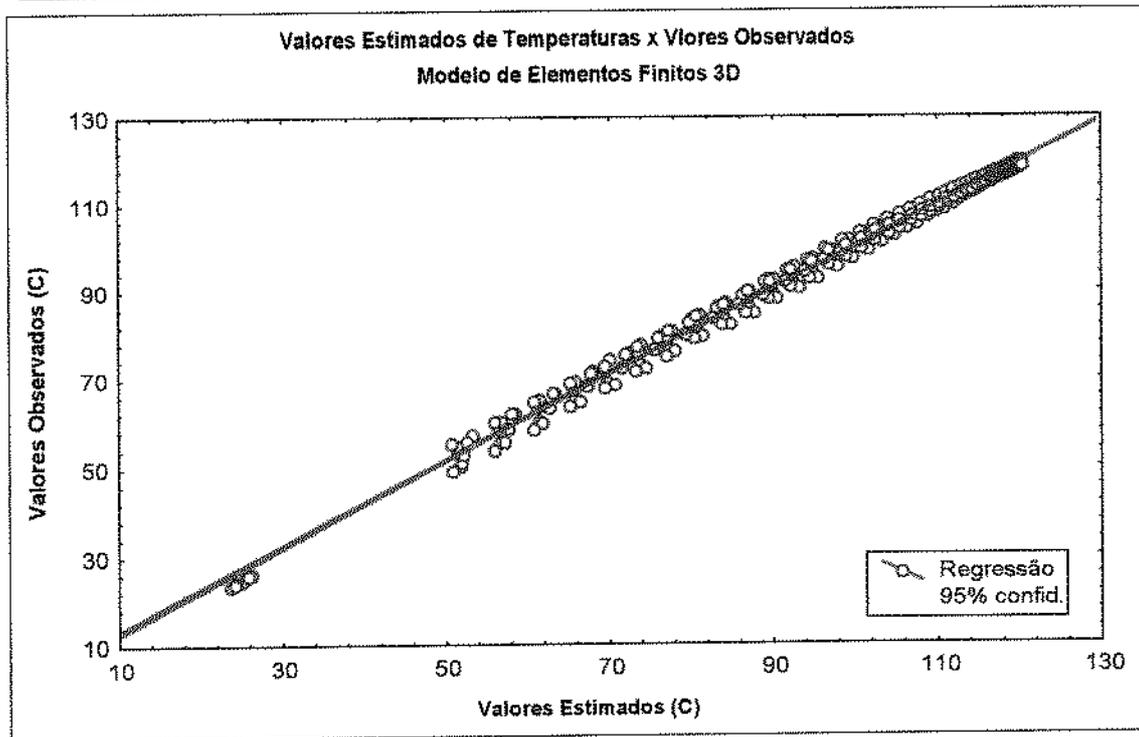


Figura 33: Regressão linear dos Valores Experimentais x E. Finitos 3D (aquecimento)

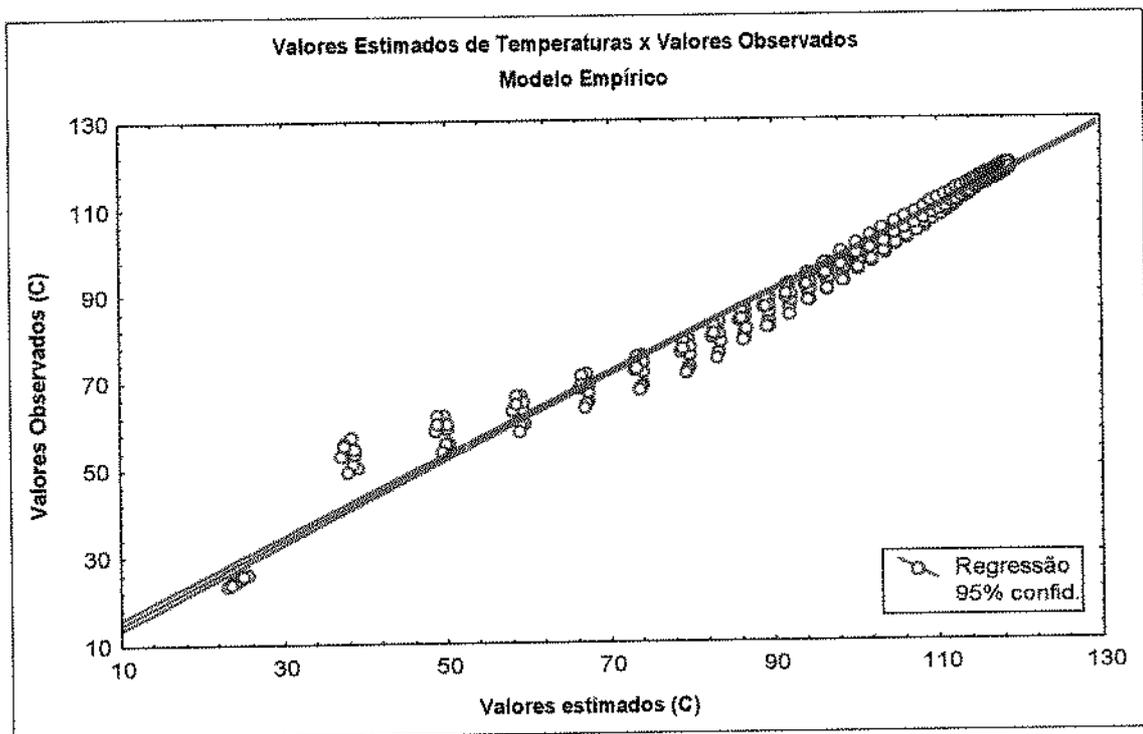


Figura 34 : Regressão linear dos Valores Experimentais x Empírico (aquecimento)

Analisando-se os dados da fase de resfriamento da tabela 20, pode-se observar que, de maneira semelhante ao ocorrido na fase de aquecimento, todos os modelos apresentaram coeficientes de correlação

maiores que 0,99. No entanto, os valores foram inferiores àqueles encontrados para a fase de aquecimento. Os modelos de elementos finitos mantiveram os valores de R^2 na mesma ordem de grandeza, enquanto que os outros tiveram seus coeficientes diminuídos. Quanto aos valores dos coeficientes angulares da fase de resfriamento (tabela 20), o modelo empírico foi o que mais se aproximou da unidade, seguido pelo de elementos finitos bidimensional, tridimensional e por fim o das soluções analíticas.

Ainda através da tabela 20, pode-se observar pelos resultados do teste Qui-quadrado, que os modelos de elementos finitos foram os que apresentaram os menores valores, mostrando que também no resfriamento estes modelos foram os que mais se aproximaram das medidas de temperatura obtidas experimentalmente.

As FIGURAS de 35 a 38 apresentam os gráficos das regressões lineares dos valores de temperatura observados experimentalmente no centro das bolsas versus aqueles obtidos pelos modelos na fase de resfriamento.

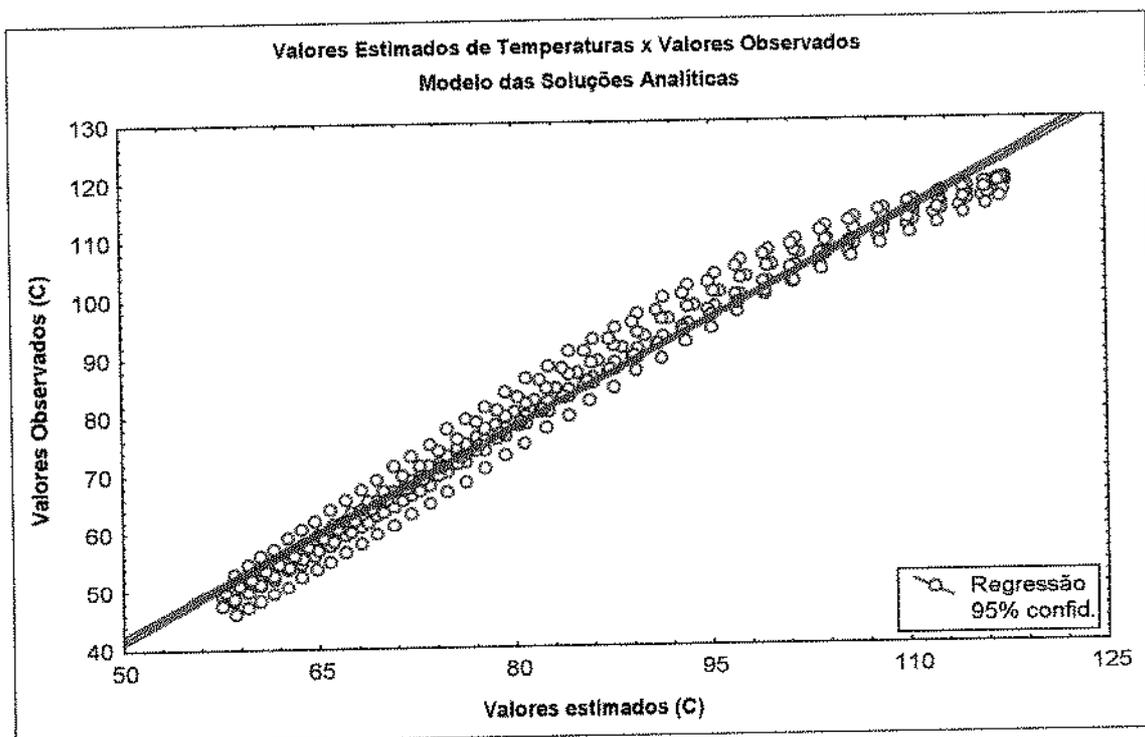


Figura 35: Regressão linear dos Valores Experimentais x Sol. Analítica (resfriamento)

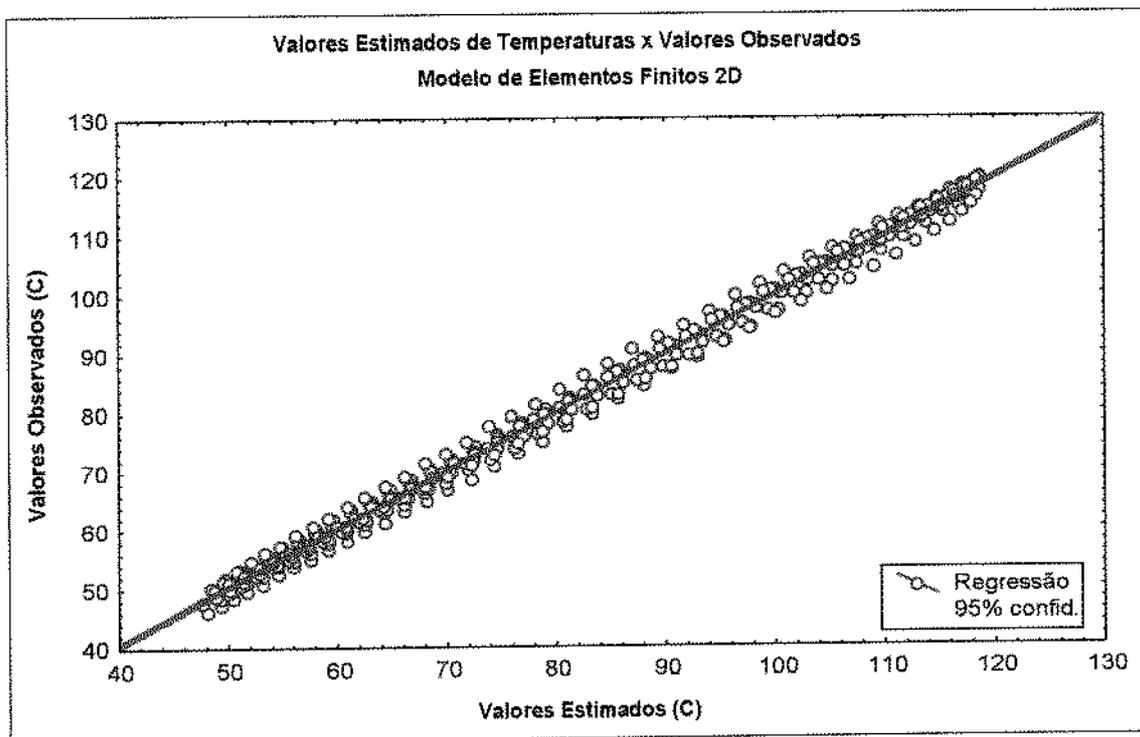


Figura 36 : Regressão linear dos Valores Experimentais x E. Finitos 2D (resfriamento)

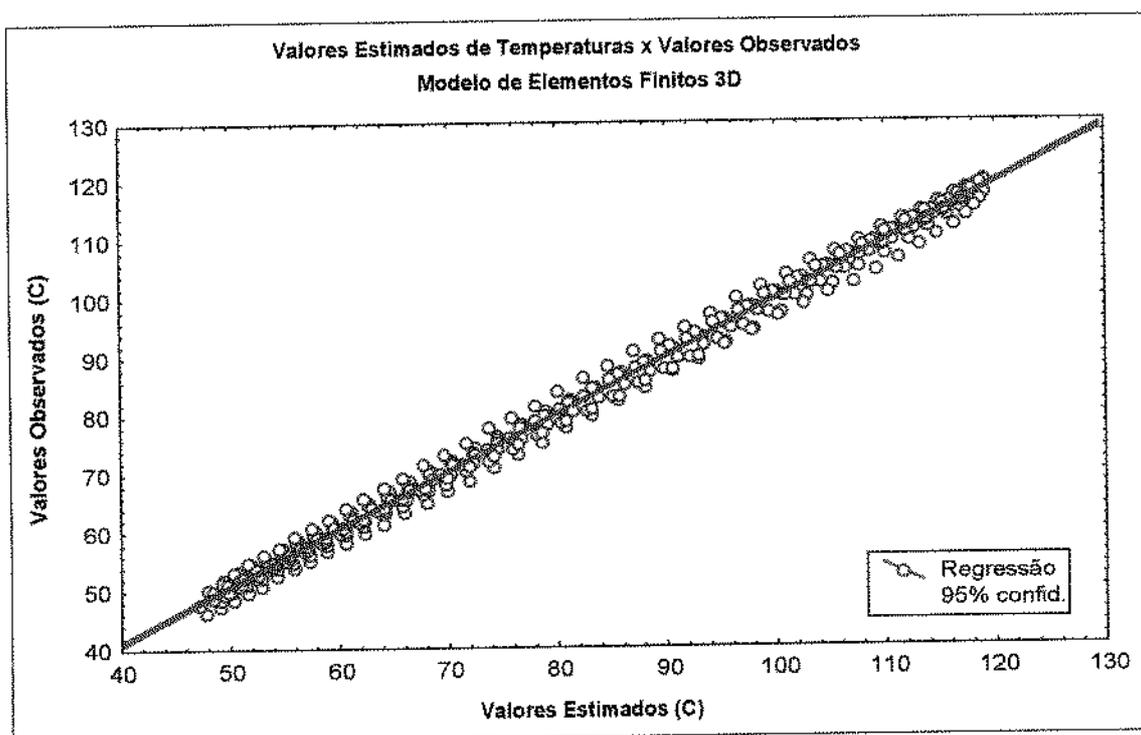


Figura 37: Regressão linear dos Valores Experimentais x E. Finitos 3D (resfriamento)

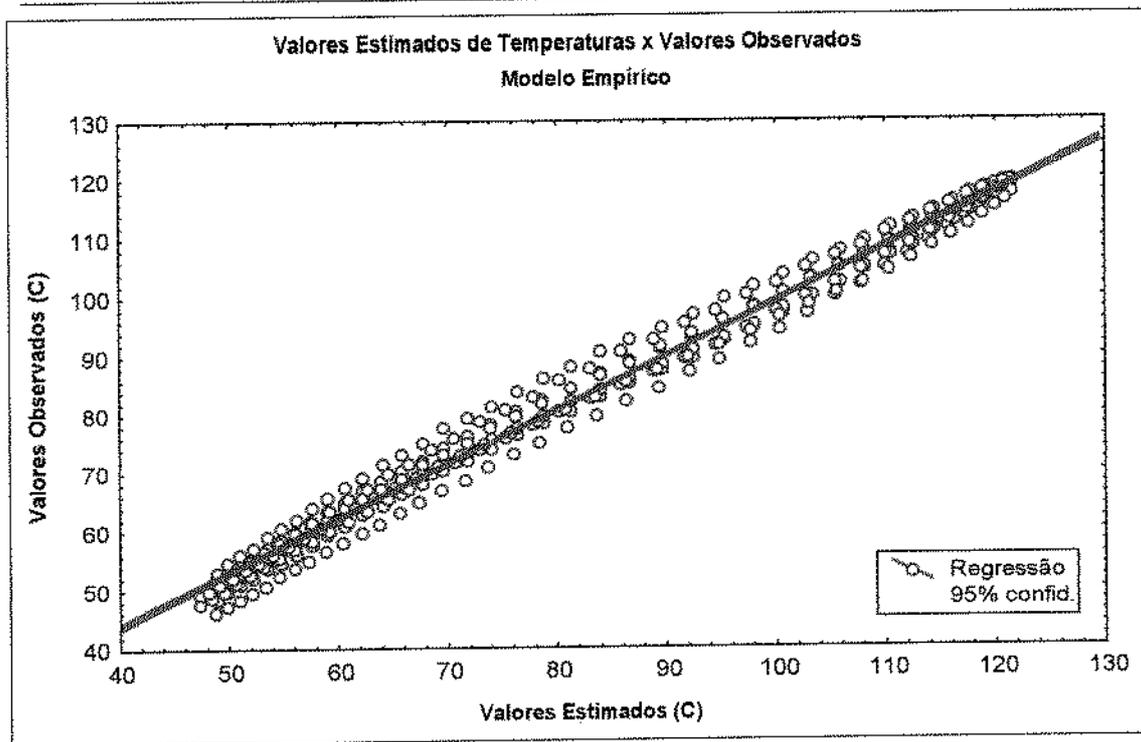


Figura 38: Regressão linear dos Valores Experimentais x Empírico (resfriamento)

Pode-se concluir com base na tabela 20 e gráficos das figuras 31 a 38 que os modelos de elementos finitos apresentaram melhores resultados que o modelo empírico e das soluções analíticas, com base estatística dos coeficientes de correlação, Qui-quadrado e distribuição mais homogênea dos valores em torno das retas da regressão linear.

A FIGURA 39 apresenta um perfil de temperaturas medidas no centro da bolsa e em duas posições intermediárias (a 0,475mm e 0,713mm do centro) comparadas com os valores estimados pelo modelo tridimensional de elementos finitos. Pode-se observar que o perfil gerado pelo modelo para temperaturas que não somente no centro da bolsa, estão bastante próximas àquelas medidas experimentalmente. Esta é uma grande vantagem deste método pois permite obter resultados de temperatura em qualquer posição, mesmo aquelas que, por acaso, não contemplem um nó, pois as temperaturas podem ser interpoladas entre dois nós.

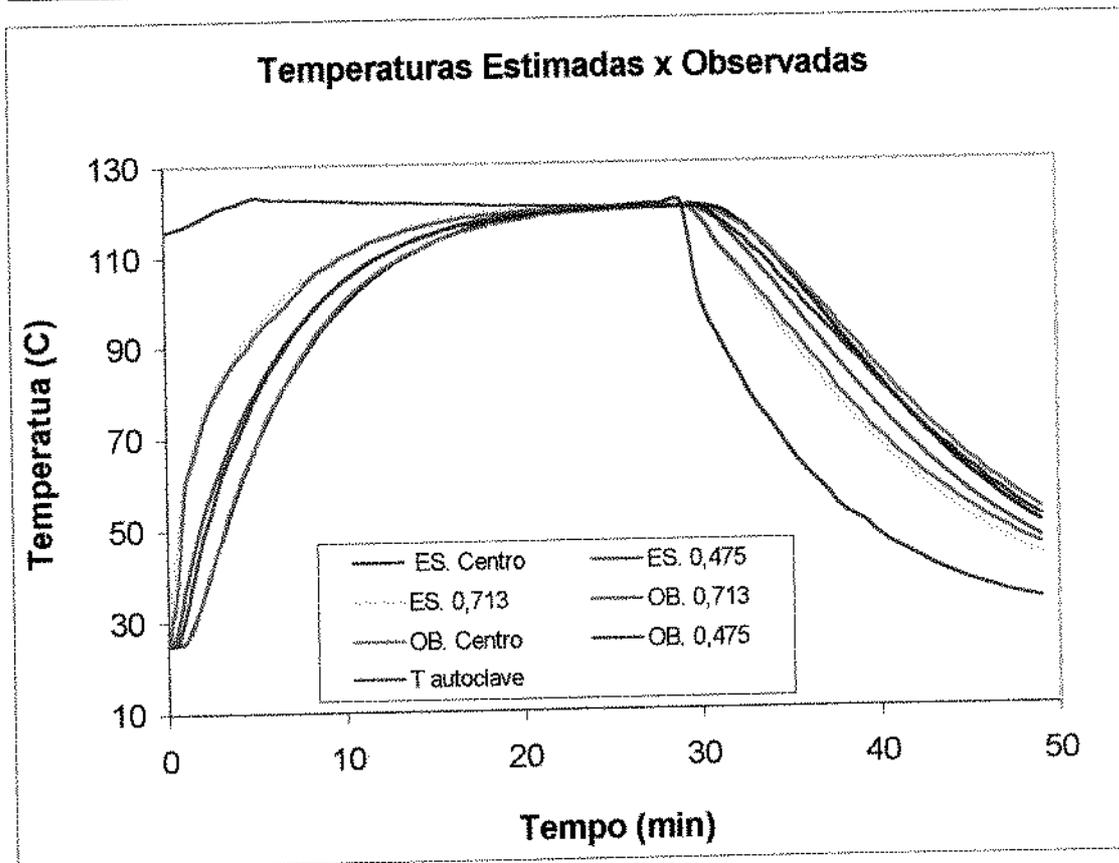


Figura 39 : Perfil de Temperaturas Estimadas pelo Modelo de Elementos Finitos 3D para as Posições Central (ES. centro), a 0,475mm (ES 0,475) e a 0,713 mm (ES. 0,713) do Centro, Contra as Observadas Experimentalmente (OB).

As FIGURAS 40 a 44 apresentam uma representação gráfica dos perfis de temperatura no interior da bolsa em diferentes etapas do processo.

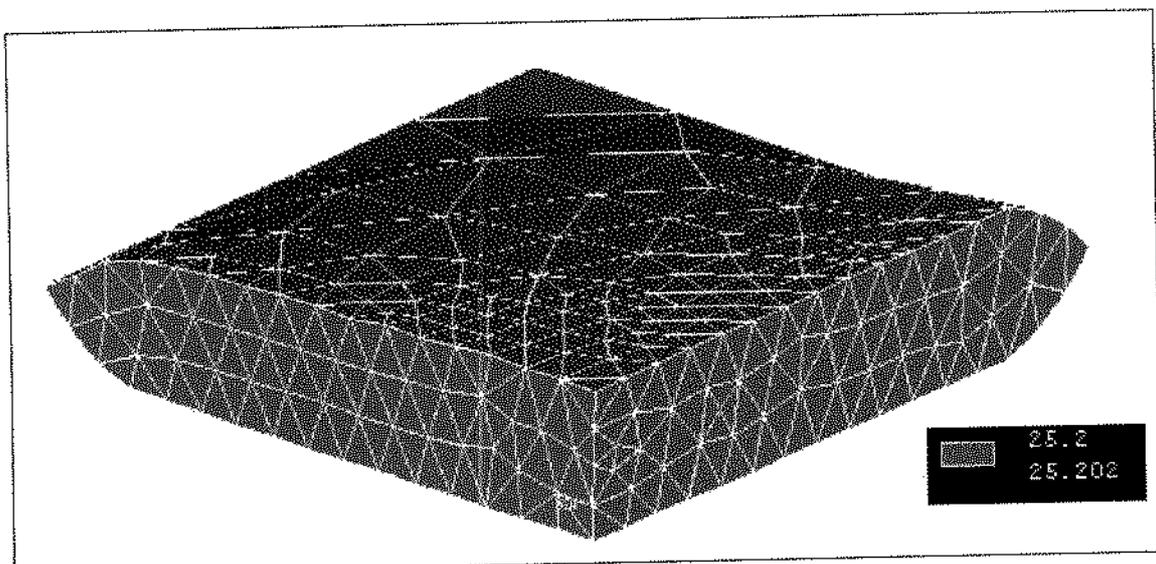


Figura 40: Perfil de Temperaturas na Bolsa no Tempo Zero.

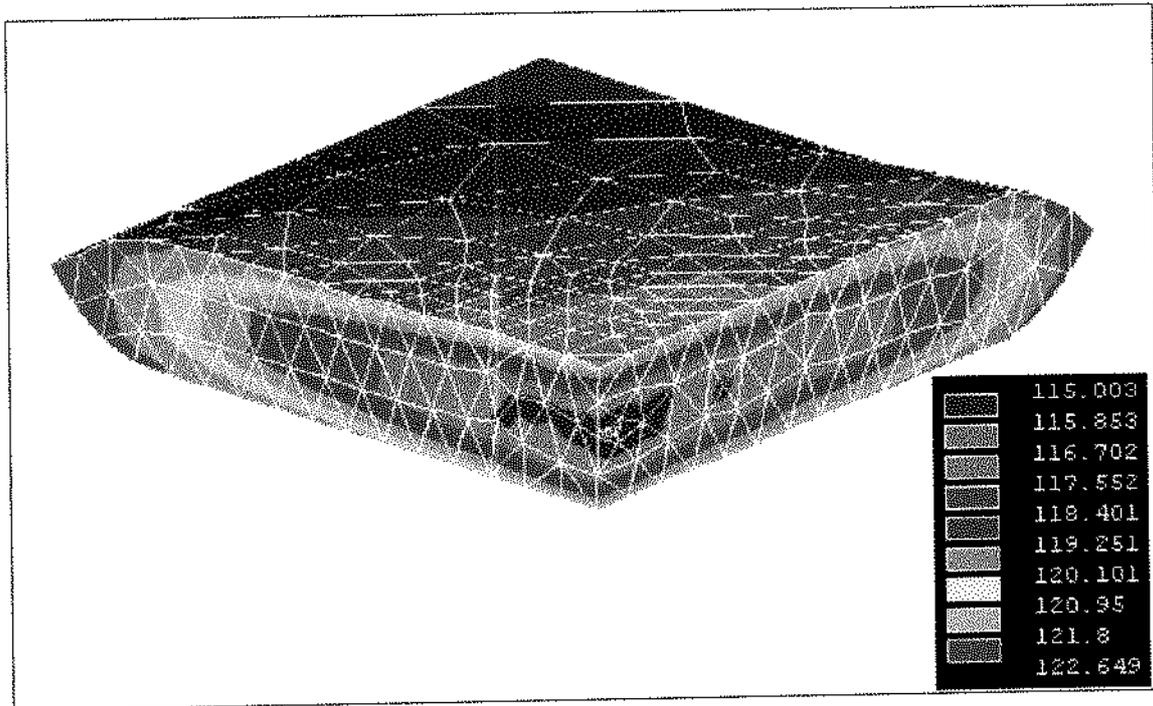


Figura 41: Perfil de Temperaturas na Bolsa no Tempo 1000s.

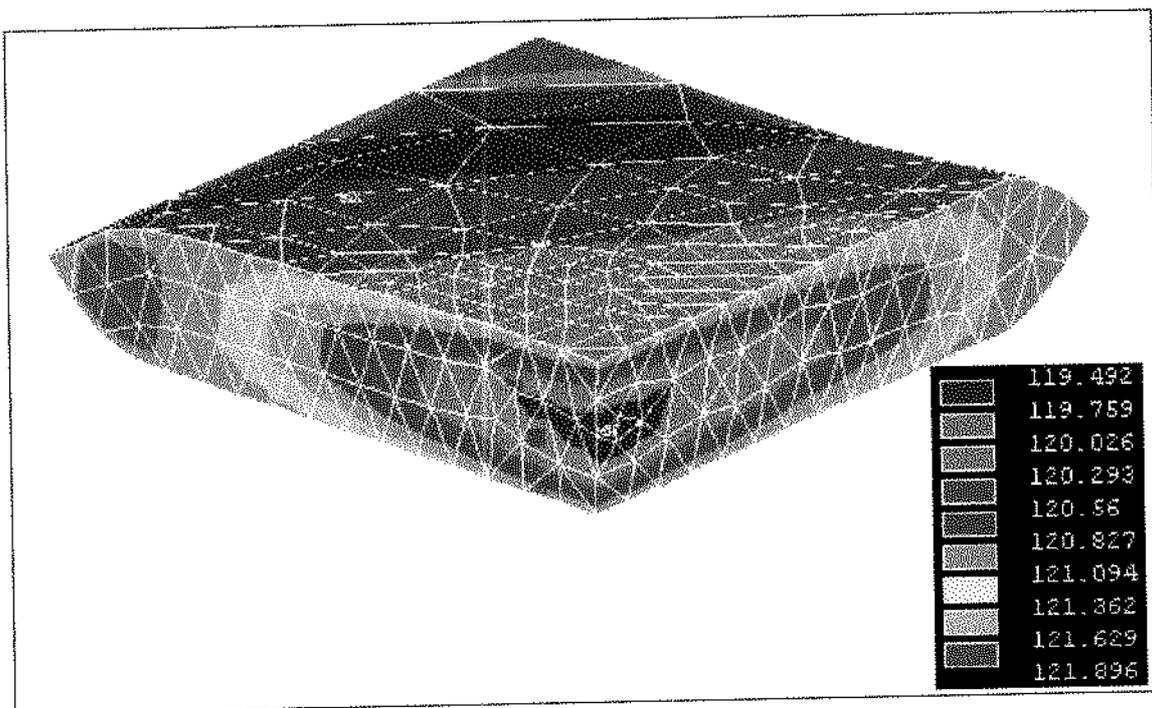


Figura 42: Perfil de Temperaturas na Bolsa no Tempo 1350s.

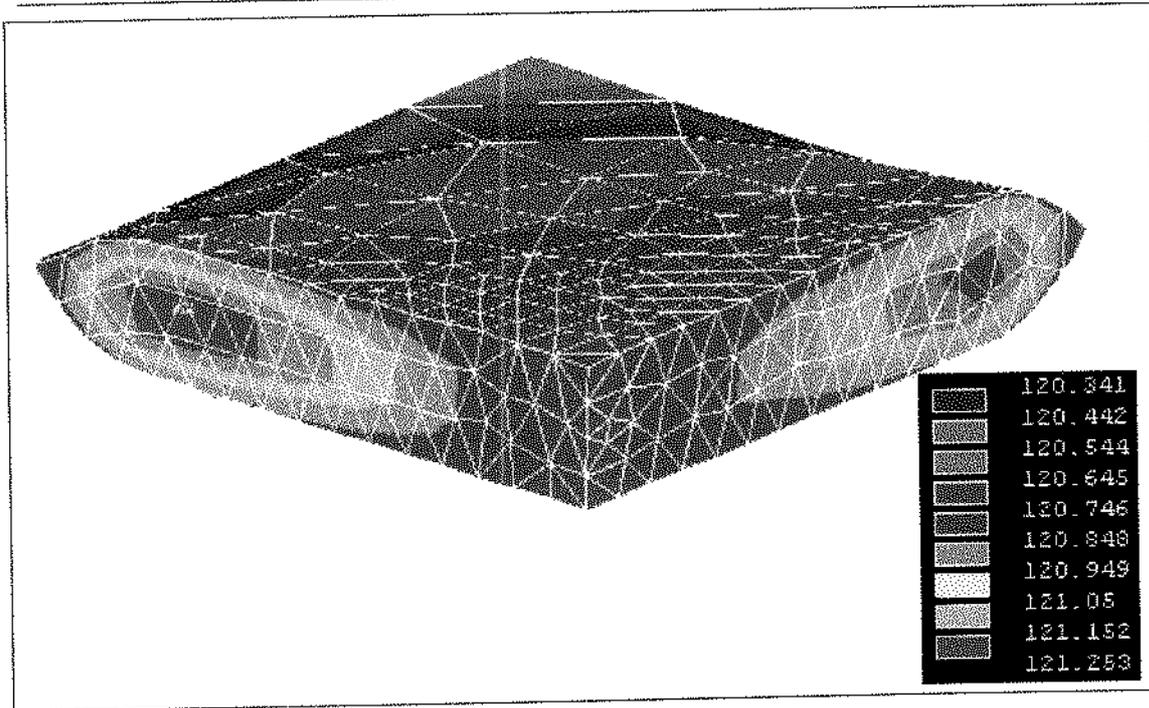


Figura 43: Perfil de Temperaturas na Bolsa no Final do Aquecimento (1740s).

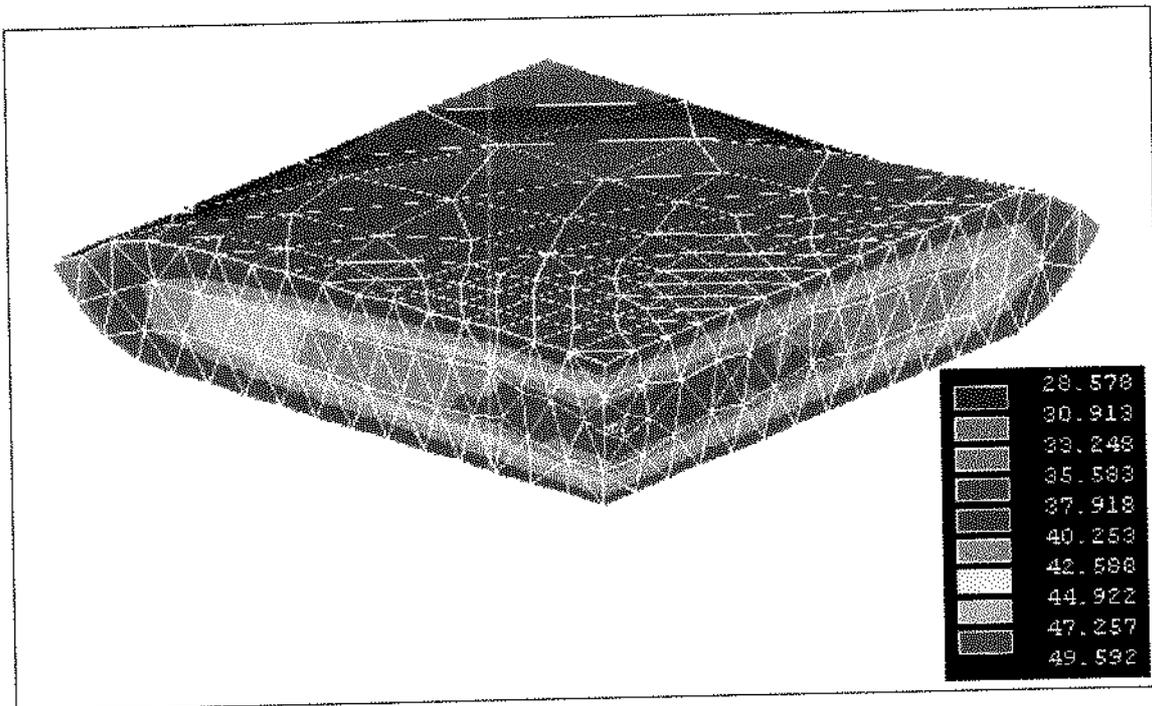


Figura 44: Perfil de Temperaturas na Bolsa no Final do Resfriamento.

Pode-se observar através das figuras 40 a 44, que a partir do tempo 1000s, inicia-se a formação de uma região elíptica diferenciada

próxima da lateral da bolsa. Esta região pode ser observada em uma das laterais no tempo igual a 1350s e, posteriormente, nas duas laterais, no final do aquecimento. Este fenômeno pode ser explicado devido ao fato de se ter utilizado um perfil de temperaturas do meio de aquecimento como condição de contorno. Este perfil tem um pico no tempo de 420s e, a partir daí, uma queda gradual até o final do tempo de aquecimento (1740s). Embora esta queda seja pequena, este fato provocou uma diminuição na taxa de calor sendo aplicada na superfície da bolsa e o método foi suficientemente sensível para perceber as pequenas variações da onda térmica.

A FIGURA 45 apresenta um perfil de temperaturas na bolsa no final da curva de aquecimento, desta vez obtido considerando a temperatura do meio de aquecimento constante ao longo do tempo. Pode-se observar que desta vez houve um aquecimento a taxa de calor uniforme, não havendo a formação das regiões de temperatura diferenciadas como na figura 43.

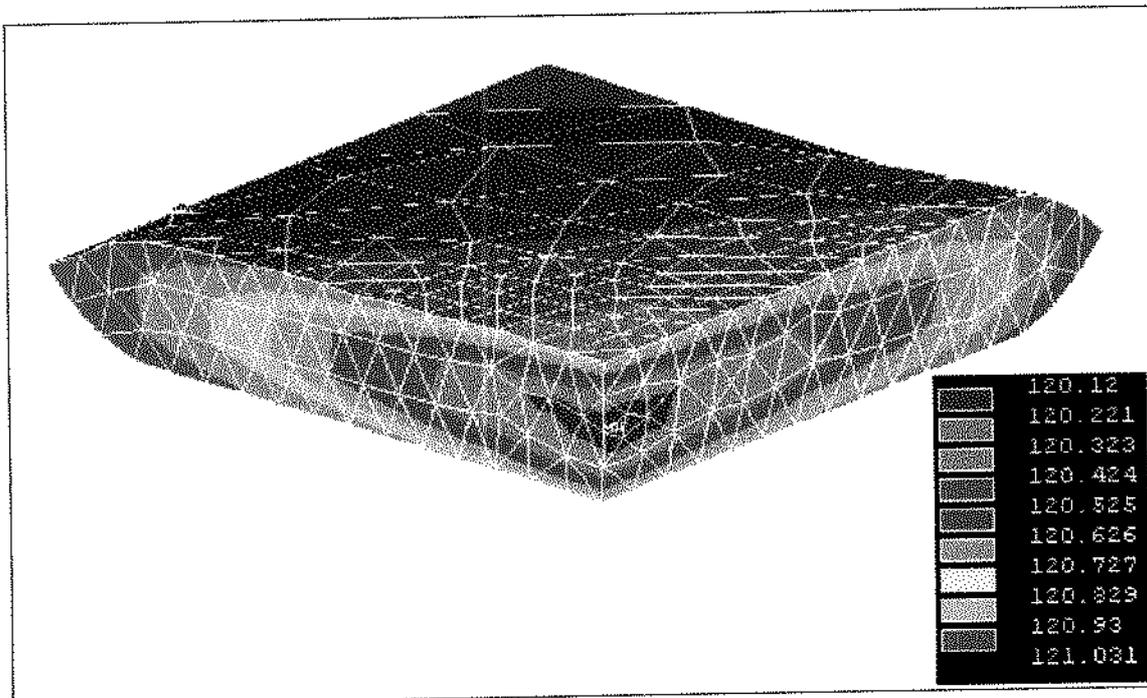


Figura 45: Perfil de Temperaturas na Bolsa no Final do Aquecimento Considerando a Temperatura do Meio Constante.

As FIGURAS 46 e 47 apresentam perfis de temperaturas obtidos do modelo 3D de elementos finitos. Estes perfis correspondem a temperaturas em diferentes posições dentro da bolsa, obtidas partindo-se de caminhos definidos que vão em linha reta do centro da bolsa para a superfície da mesma. Um deles percorrendo o sentido transversal (FIGURA 46) e o outro uma das seções longitudinais (FIGURA 47).

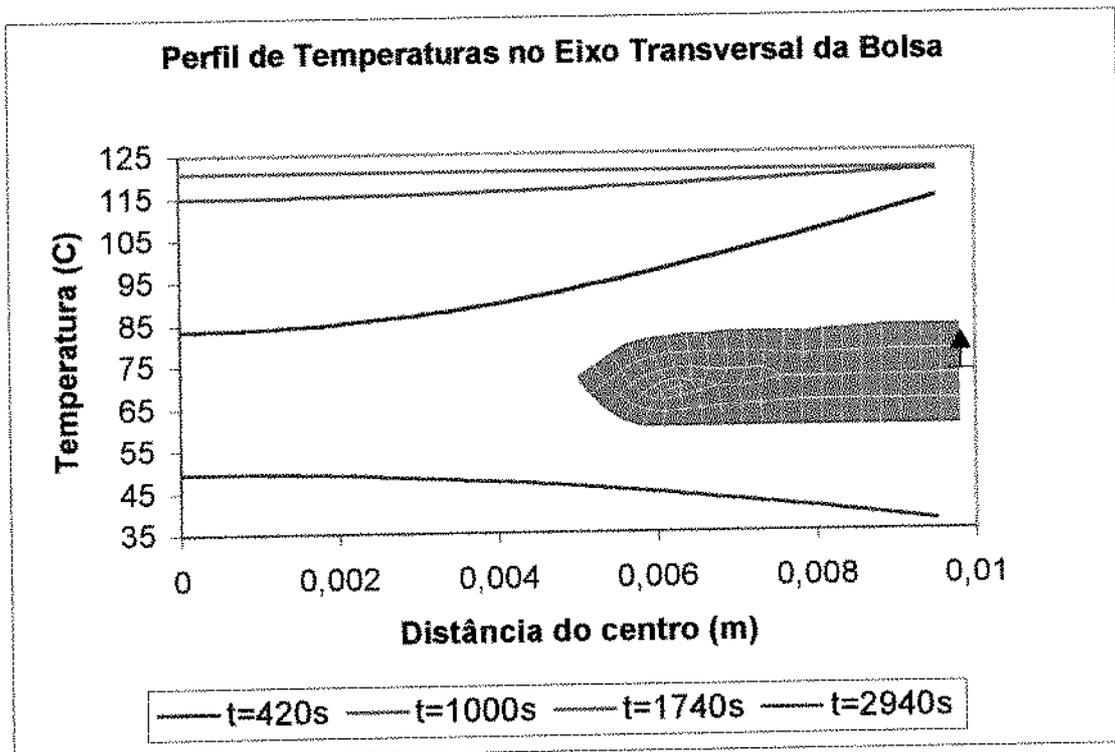


Figura 46 : Perfil de Temperaturas na Seção Transversal da Bolsa em Diferentes Tempos do Processo.

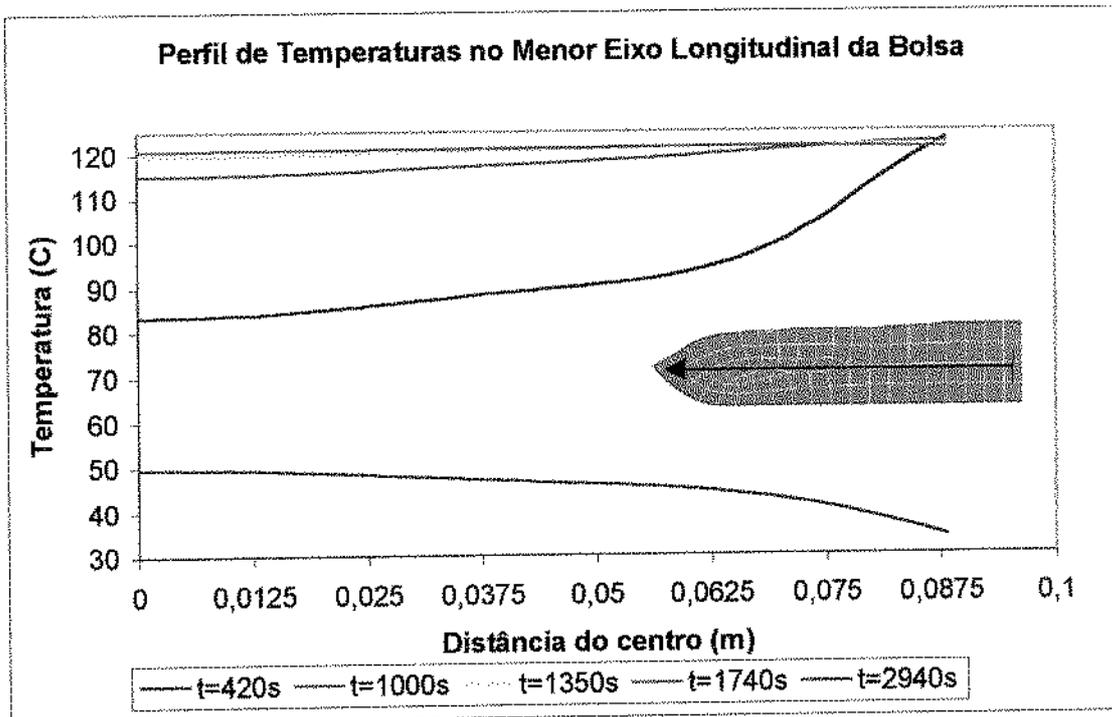


Figura 47: Perfil de Temperaturas na Seção Longitudinal da Bolsa em Diferentes Tempos de Processamento.

Pode-se observar pela figura 46, que devido ao perfil estreito da bolsa, logo após o tempo de subida ($t=420s$) a temperatura no centro já está a mais de $80^{\circ}C$ enquanto que a superfície está próxima de $110^{\circ}C$. Ainda, no tempo $1000s$, todo produto já está a mais de $115^{\circ}C$. Este perfil estreito evita que as regiões externas do produto fiquem expostas a altas temperaturas por longos períodos até que seja alcançado o F_0 desejado no ponto frio.

Com base nos resultados de temperaturas do modelo tridimensional utilizando o método de elementos finitos, várias informações de importância tecnológica podem ser obtidas. Uma vez conhecidas as temperaturas ao longo do tempo em todos os nós (e consequentemente em todos os elementos), é possível estimarmos a retenção de nutrientes, a destruição de microrganismos, degradação de cor, e todos outros parâmetros tecnológicos dependentes de temperatura, em toda ou apenas algumas regiões de interesse do modelo. Isto permite a simulação de processos no intuito de escolher a melhor combinação de

tempo e temperaturas, ou mesmo um perfil de temperaturas, que venha proporcionar um produto de melhor qualidade a menores custos.

Segundo STUMBO (1973), a temperatura média da massa (T_m) em um sólido pode ser definida como:

$$T_m = \frac{1}{V} \int_0^V T dv \quad 4.4.2$$

onde T é função do volume V .

O conhecimento da temperatura média da massa é significativa, uma vez que é aproximadamente a temperatura que o corpo assumiria quando equilibrado adiabaticamente. Em termos de processamento térmico de alimentos condutivos este valor pode, por exemplo, ajudar a prever destruição excessiva de nutrientes pelo calor.

Considerando-se a temperatura média de um elemento qualquer do modelo como sendo a média das temperaturas dos nós que formam o mesmo e que a somatória de todos os elementos é igual ao volume total do sólido, pode-se considerar uma aproximação para a integral acima descrita em 4.4.2 como a somatória das temperaturas médias de cada elemento multiplicado pelo volume do mesmo e dividido pelo volume total do modelo, conforme segue:

$$T_m = \frac{1}{V} \sum_{e=1}^n T_e V_e \quad 4.4.3$$

onde T_e e V_e são a temperatura e o volume dos elementos, n o número de elementos do modelo e V o volume total do modelo. Quanto maior o número de elementos, mais próximo o resultado da somatória acima se aproxima da integral descrita em 4.4.2.

A FIGURA 48 apresenta um gráfico com as temperaturas no centro de uma bolsa e os respectivos valores de F_p obtidos no final do

aquecimentos e resfriamento, bem como a temperatura média da massa calculada pelo método descrito pela equação 4.4.3.

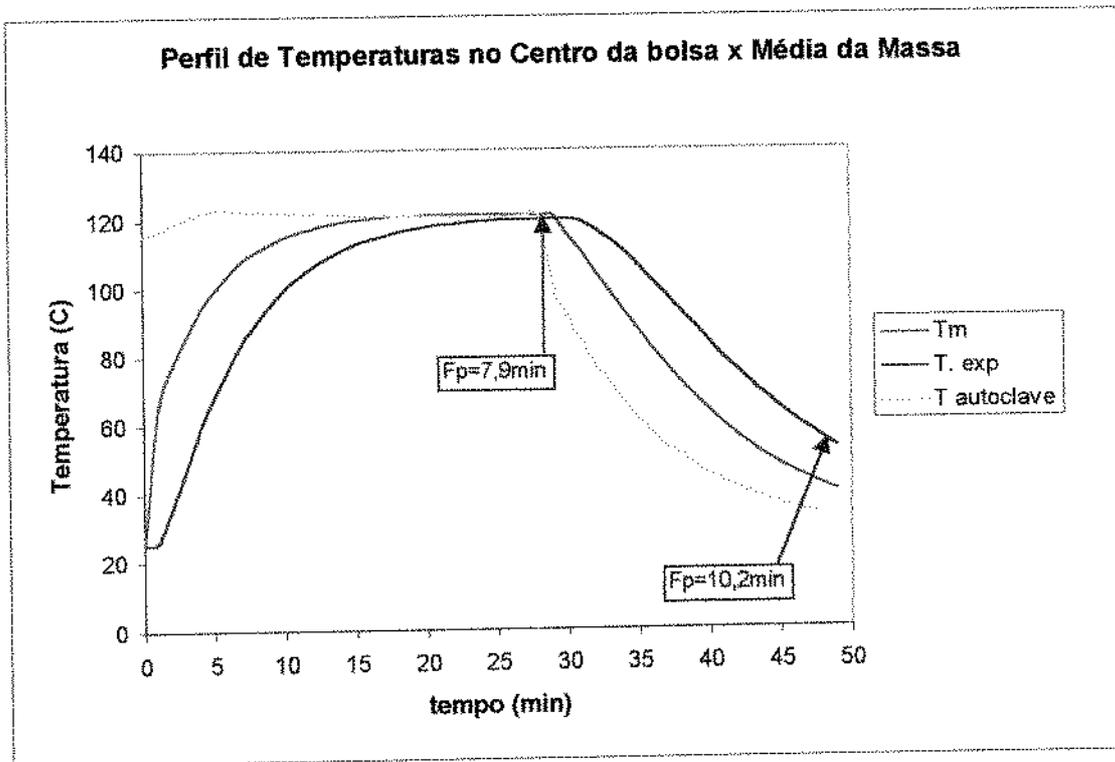


Figura 48: Temperatura Experimental no Centro de uma Bolsa x Temperatura Média da Massa

Para o experimento mostrado na figura 48, o valor de F_p calculado utilizando-se as temperaturas experimentais no ponto frio foi de 7,9 min até o final do aquecimento, enquanto que o mesmo valor calculado usando as temperaturas estimadas pelo método das soluções analíticas foi de 7,2 min, pelo método de elementos finitos bidimensional 8,1 min, elementos finitos tridimensional 8,7min e empírico 9,7min. Considerando o resfriamento, os valores de F_p encontrados foram de 10,2min, 9,1min, 10,9min, e 11,9 min para as temperaturas experimentais, estimadas pelo método das soluções analíticas, elementos finitos bidimensional, tridimensional e empírico, respectivamente.

O valor de esterilização média da massa foi obtido para o experimento mostrado na figura 48 (item 3.5). A distribuição de temperaturas na bolsa ao longo do tempo foi calculada utilizando-se o modelo de elementos finitos. Conhecidas as temperaturas, as taxas de

destruição de microrganismos foram calculadas e aplicadas para os volumes de cada elemento em pequenos intervalos de tempo. O número de sobreviventes na bolsa foi obtido somando-se os volumes de todos os elementos para cada minuto de processo. Esta técnica não requer o uso de tabelas nem mesmo considerações de fatores de atraso ou regiões iso-j. O valor de esterilização média da massa obtida no final do tempo de aquecimento foi de 9,94 min, enquanto que o acumulado no final do processo foi de 12,02min. A FIGURA 49 apresenta um perfil do valor de esterilização média da massa ao longo do tempo de processamento.

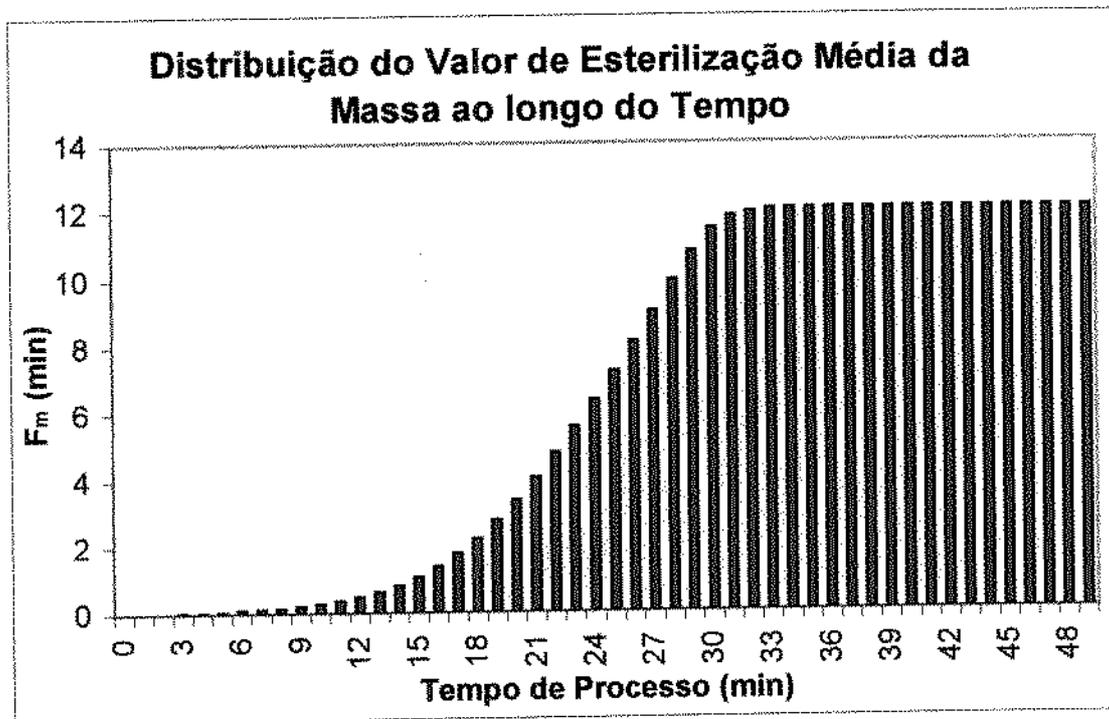


Figura 49 : Distribuição do Valor de Esterilização Média da Massa Durante o Processamento Térmico das Bolsas

Uma outra maneira de se avaliar o efeito do processamento em regiões distintas da bolsa é considerar o valor de F_p obtido em cada um dos elementos. A FIGURA 50 apresenta dois histogramas com os valores de esterilização obtidos nos elementos do modelo tridimensional de elementos finitos no final do tempo de aquecimento e o acumulado no final do tempo de resfriamento. Através da referida figura (duas distribuições tipo gama de obliquidade positiva) pode-se ter uma visão global da distribuição dos valores de F_p por todo o produto. Pode-se observar que alguns elementos

chegam a obter valores de F_p acima de 39 min. Este tipo de análise pode ser útil na otimização de processos de maneira a selecionar temperaturas e tempos de processamento de modo a obter uma distribuição mais uniforme evitando tratamento térmico muito severo em regiões próximas as superfícies das embalagens.

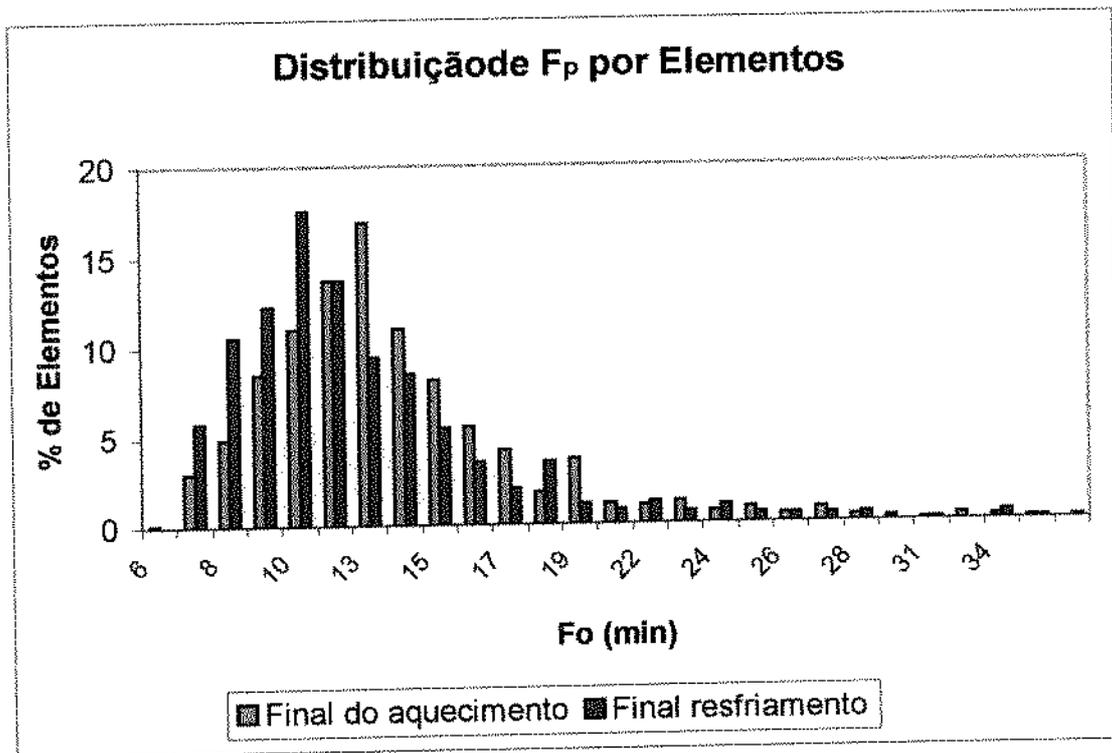


Figura 50: Distribuição dos valores de F_p no final do tempo de aquecimento e o acumulado no final do resfriamento obtidos por elementos do modelo 3D de elementos finitos.

5 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos no presente estudo da distribuição de temperaturas durante o processo de esterilização de atum em bolsa flexível pode-se concluir que:

- a adaptação do sistema para processamento de bolsas institucionais numa autoclave ALLPAX foi eficiente, comprovado pelos teste de distribuição de temperaturas no interior da mesma. O uso de espaçadores que proporcionaram um canal de circulação de água de 4cm apresentou distribuição de temperaturas de acordo com as normas estabelecidas pelo NFPA.
- as embalagens institucionais utilizadas apresentaram ótima performance durante o processo, não apresentando nenhum tipo de vazamento ou outro tipo de defeito.
- as análises de esterilidade comercial comprovaram que um F_0 de 7min empregado para atum ralado (*Katsuwonus pelamis*) em salmoura foi suficiente para obter um produto microbiologicamente estável
- dos quatro modelos matemáticos de transferência de calor testados (soluções analíticas, fórmulas empíricas e elementos finitos bidimensional e tridimensional) para avaliar o perfil de temperaturas no centro das bolsas, o de elementos finitos tridimensional foi o que estatisticamente melhor representou os dados obtidos experimentalmente, tanto no aquecimento quanto no resfriamento.
- a possibilidade da utilização de um perfil de temperaturas como condição de contorno dos meios de aquecimento e resfriamento, conferiu uma melhor performance aos modelos de elementos finitos principalmente na fase de resfriamento, que neste tipo de autoclave é crítico devido a mistura da água de entrada do resfriamento com a água de aquecimento nos primeiros minutos da referida fase.

- a utilização de um modelo tridimensional de elementos finitos mostrou ser uma ferramenta bastante útil para estudar a distribuição de temperaturas por todo o sólido. Este fato tem grande importância tecnológica uma vez que possibilitará estudar de maneira mais detalhada todas as alterações provocadas pelo calor nos alimentos processados em diferentes tipos de alimentos (compostos ou não) processados em vários tipos, formas e tamanhos de embalagens.
- Uma sugestão para estudos complementares seria avaliar experimentalmente o valor de esterilização média da massa utilizando diferentes tamanhos de elementos e, ainda, construir um modelo para otimizar as condições de processo de maneira a minimizar a destruição de nutrientes.

BIBLIOGRAFIA

- AACC (1983). Approved Methods. 8ed. American Association of Cereal Chemists. St. Paul.
- ADAMS, J. P.; PETERSON, W. R. and OTWELL, W. S. (1983). Processing of Seafood in Institutional-Sized Retort Pouches. *Food Tech.*, April, p.123-127.
- AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (1990) Standard Test Method for Seal Strength of Flexible Barrier. ASTM F88-85. Philadelphia: ASTM, p.857-859.
- AOAC. (1975) Official Methods of Analysis. 12ed Washington D.C., Horwitz, W., p.927-928.
- ANÔNIMO (1980). Retort Packaging and Systems. *Packaging Japan*, jan., v.1.
- ANÔNIMO. (1990). Retort Trend and Prospect of Retort Sterilizing Technique. *Packaging Japan*, may, p.26-34.
- ANÔNIMO 1991). Fujimori's Packaging Materials for Retort Food. *Packaging Japan*, may, p.31-34.
- ARPACI, V. S. (1966). Conduction Heat transfer. Addison-Wesley Publ. Co. Reading MA, p.274.
- BALL, C. O. & OLSON, F.C.W. (1957). Sterilization in Food Technology. McGraw-Hill book Company, Inc. New York. USA.
- BANGA, J. R. et al. (1991) Optimization of the Thermal Processing of Conduction- Heated Canned Foods: Study of Several Objective Functions. *J. of Food Eng.*, p25-49.
- BANGA, J. R. et al. (1993). Mathematical Modeling and Simulation of the Thermal Processing of Anisotropic and Non-homogeneous Conduction-heated Canned Foods: Application to Canned Tuna. *J. of Food Eng.*, v.18, p. 369-387

- BEVERLY, R. G., STRASSER, J. and WRIGHT, B. (1908). Critical Factors in Filling and Sterilizing of Institutional Pouches. *food tech.*, sep, p.44-50.
- BLIGH, E. G. & DYER, W. J. (1959). A Rapid Method of Total Lipid Extraction and Purification. *Can. J. Biochem. Physiol.*,37:911-917
- BRODY, A. L. (1994). Japanese Food Packaging Technology: A Risen Sun Shines in New Directions. *Quick Frozen Foods International*. 35(4)134-138.
- BUHRI, A.B. & SINGH, R.P. (1993). Measurement of Food Thermal Conductivity Using Differential Scanning Calorimetry. *J. of Food Sci.*,58(5)1145-1147.
- CAMPBELL, S. and RAMASWAMY, H. S. (1992). Heating Rate, Lethality and Cold Spot Location in Air-entrapped Retort Pouches during Over-pressure Processing. *J. of Food Sci.*, v.57, n.2, p.485-489.
- CARDELLI, C. F. (1992). Estudo da Esterilização numa Autoclave Vertical Modificada para o Processamento de Bolsas Flexíveis. Campinas: UNICAMP. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Alimentos. Faculdade de Engenharia de Alimentos.
- CARSLAW, H. S. and JAEGER, J. C. (1959). Conduction of Heat in Solids. 2ed. Oxford University Press. London.
- CARVALHO, C. D. (1996) Utilização do Bioteste com Esporos de *Bacillus subtilis* na Avaliação da Integridade Asséptica de Embalagens Flexíveis Esterilizáveis. Campinas: UNICAMP. Dissertação de Mestrado em Ciência de Alimentos. Faculdade de Engenharia de Alimentos.
- CASTILLO, P. F.; BARREIRO, J. A. and SALAS, G. R. (1980). Prediction of Nutrient Retention in Thermally Processed Heat Conduction Food Packaged in Retortable Pouches. *J. of Food Sci.*, v.45, p.1513-1528.
- CRISTIANINI, M. (1988). Ohmic Heating: A Process Overview and its Characteristics as a Food Preservation Technique. Tese de Mestrado

em Ciência de Alimentos. Department of Food Science. University of Reading. England, UK.

- DURANCE, T. D. and COLLINS, L. S. (1991). Quality Enhancement of Sexually Mature Chum Salmon *Oncorhynchus Keta* in Retort Pouch. *J. of Food Sci.*, v.56, n.5, p.1282-1286.
- ELANSARY, Atef. M. & SINGH, R.P. (1995). A Transient Method to Measure Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity Using Differential Scanning Calorimeter. Artigo enviado para publicação.
- EVANS, K.W; THORPE, R.H & ATHERTON, D. (?) Guidelines on good manufacturing practice for sterilisable flexible packaging operations for low-acid foods. Technical-Manual,-Campden-Food-Preservation-Research-Association; No. 4, xiii + 23pp
- GOVARIS, A. K. and SCHOLEFIELD, J. (1988). Comparison of a Computer Evaluation with a Standard Evaluation of Retort Pouch Thermal Processing. *Int. J. of Food Sci and Technol.*, v.23, p.601-606.
- HAYAKAWA, K. (1970). Experimental Formulas for Accurate Estimation of Transient Temperature of Food and Their Application to thermal Evaluation. *Food Technology*, v.24, Dec, p.1407-1418.
- HAYAKAWA, K. (1978). A Critical Review of Mathematical Procedures for Determining Proper Heat Sterilization Process. *Food Technology*, March, p.59-83.
- HEINTZ, D.A. (1980). Marketing Opportunities for Retort Pouches. *Food Tech.*, sep., p.32-38.
- HODGE, J. E. & HOFRETER, B. T. (1962). Determination of Reducing Sugars and Carbohydrates . *Methods in Carbohydrate Chemistry*. N.Y., Academic Press. Vol. 1, p.388
- HOOPER, F. C. and LEPPER, F. R. (1950). Transient Heat Flow Apparatus for the Determination of Thermal Conductivities. *ASHVE Trans.* 56:309-24.
- LAMPI, R.A. (1977). Flexible Packing for Thermoprocessed Foods. *Adv. Food Research*, 305.

- LEBOWITZ, S. F. and BHOWMIK, S. R. (1989). Determination of Retortable Pouch Heat Transfer Coefficients by Optimization Method. *J. of Food Sci.*, v.54, n.6, p.1407-1412.
- LEBOWITZ, S. F. and BHOWMIK, S. R. (1990). Effect on Retortable Pouch Heat Transfer Coefficient of Different Thermal Processing Stages and Pouch Material. *J. of Food Sci.*, v.55, n.5, p. 1421-1434.
- LESS, R. (1979). Manual de Análises de Alimentos. Ed. Acribia, Zaragoza.
- LOPEZ, A. (1981). A Complete Course in Canning. Chapter 14. 11th ed. Canning Trade Inc, Maryland, Baltimore.
- MANSON, J. E.; STUMBO, C. R. and ZAHRANDNIK, J. W. (1974). Evaluation of Thermal Processes for Conduction Heating Foods in Pear-Shaped Containers. *J. of Food Sci.*, v.39, p.276-281.
- McGINNIS, D. S. (1986). Prediction of Transient Conduction Heat Transfer in Food Packaged in Flexible Retort Pouches. *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.*, v.19, n.4, p.148-157.
- MOHSENIN, N. N. (1986) Physical Properties of Plant and Animal Material. Gordon and Breach. Science Publishers, Inc.
- MOSSEL, D. A. ; CORRY, J.E.L; STRUIJK, C. B. & BAIRD, R. M. (1995). Essentials of the Microbiology of Foods. John Wiley & Sons Ltd. West sussex, UK.
- NASSU, R. T. (1994) Estudo do Comportamento Térmico de Óleos e Gorduras por Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC). . Campinas: UNICAMP. Dissertação de Mestrado em Tecnologia de Alimentos. Faculdade de Engenharia de Alimentos.
- NAVEH,D.; KOPELMAN, I. J. and PFLUG, I.J. (1983). The Finite Element Method in Thermal Processing of Foods. *J. of Food Sci.*, v.48, p.1086-1093.
- NIX, G. H.; LOWERY, G. W.; VACHON, R. I. & TANGER, G. E. (1967). Direct Determination of Thermal Diffusivity and Conductivity with a Refined Line-source Technique. *Progress in aeronautics and*

astronautics: Thermophysics of Spacecraft and Planetary bodies, 20:865-878, Academic press, NY.

- OHLSSON, T (1980). Optimal Sterilization Temperatures for Flat Containers. *J. of Food Sci.* 45(4):848-852.
- OLIVEIRA, L. M. de et al. (1986). Atum em Conserva: Potencialidade de uma Embalagem Alternativa. Campinas. *Bol. ITAL*, v.23, n.1, p.118-125.
- OLIVEIRA, L. M. de et al. (1988). Estudo de Estabilidade de Pescado Esterilizado em Embalagens Institucionais Flexíveis e Metálicas. Campinas. *Colet. ITAL.*, v.18, n.2, p.177-184.
- OLIVEIRA, L.M. & ALVES, R.M.V. (1992). Influência do Perfil da Mandíbula de Fechamento no Desempenho da Termossoldagem de Embalagens Flexíveis . Coletânea do Instituto de Tecnologia de Alimentos-ITAL. Campinas,n.2, vol 22, p.194-208.
- ORTIZ, S. A. (1986). Desempenho de Embalagens Flexíveis para Alimentos Termoprocessados Quando Submetidas a Simulação de Manuseio e Transporte. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- PEREZ-MARTIN, R. I.; BANGA, J. R.; SOTELO, M. G.; AUBOURG, S. P. & GALLARDO, J. M. (1989). Prediction of Precooking Times for Albacore (*thunnus alalunga*) by Computer Simulation. *J. of Food Eng.*, v.10, p.83-95.
- PETERSON, W. R. and ADAMS, J. P. (1985). Temperature Sensor Placement Errors in Institutional Size Retort Pouches, *J. of Food Sci.*, v.50, p.192-196.
- PFLUG, I. J. (1975). Procedures for Carrying Out Heat Penetration Tests and Analysis of The Resulting Data. Department of Food Science and Nutrition. University of Minnessota, Mineapolis.
- PFLUG, I. J. (1982). Textbook for an Introductory Course in the Microbiology and Engineering of Sterilization Processes. 5th. ed. Environmental Sterilization Laboratory. Minneapolis,MN.

- PIGOTT, G. M. (1994). Who is the 21st Century Consumer? *Infofish International*, v.1, p.12-20.
- PURI, V. M. and ANANTHESWARAN, R. C. (1993). The Finite-Element Method in Food Processing: A Review. *J. of Food Eng.*, v.19, p.247-274.
- RAHMAN, MD. S. & DRISCOLL, R. H. (1994). Density of Fresh and Frozen Seafood. *Journal of Food Process engineering*, v.17,p.121-140.
- RAMASWAMY, H. S. ; LO, K. V. & TUNG, M. A. (1982). Simplified Equations for Transient Temperatures in Conductive Foods with Convective Heat Transfer at the Surface. *J. Food Sci.*, v.47, p. 2042-2047.
- RAMASWAMY, H. S.; CAMPBELLS, S. & PASSEY, C. (1991). Temperature Distribution in a Standard I-basket water-cascade retort. *Can. Inst. Sci. Technol. J.* vol.24,p.245-257.
- RAO, S. S. (1989). *The Finite Element Method in Engineering*. 2.ed. Pergamon Press, UK.
- RIPPEN, A. L. & REIDY, G. A. (1971). Methods for Determining Thermal Conductivity in Foods. *Transactions of the ASAE*, p.248-254.
- RIZVI, S. S. H. & ACTON, J. C. (1982). Nutrient Enhancement of Thermostabilized Foods in Retort Pouches. *Food Technology*. April, p.105-109.
- SASTRY, S. K.; BEELMAN, R. B. and SPERONI, J.J. (1985). A Three-Dimensional Finite Element Model For Thermally Induced Changes in Foods: Application to Degradation of Agaratine in Canned Mushrooms. *J. of Food Sci.*, v.50, p.1293- 1299.
- SEGERLIND, L. J. (1976). *Applied Finite Element Analysis*. John Wiley & Sons..New York.
- SINGH, R. P. & HELDMAN, D. R. (1993). *Introduction to Food Engineering*. 2nd. ed.Academic Press Inc. San Diego ,CA.

- SINGH, R. P. & SEGERLIND, L. J. (1974). The Finite Element Method in Food Engineering. ASAE paper No. 74-6015.
- SINGH, R. P. (1982). Thermal Diffusivity in Food Processing. *Food Tech.*, feb., p.87-91.
- SNYDER, J. C. and HENDERSON, J. M. (1989). A Preliminary Study of Heating Characteristics and Quality Attributes of Product Packaged in the Retort Pouch Compared with the Conventional Can. *J. of Food Proc. Eng.*, v.11, p.221-236.
- SOULÉ, C. L. and MERSON, R. L. (1985). Heat Transfer Coefficients to Newtonian Liquids in Axially Rotated Cans. *J. of Food Eng.*, v.8, p-33-46.
- SPINAK, S. H. and WILEY, R. C. (1982). Comparisons of the General and Ball Formula Methods for Retort Pouch Process Calculations. *J. of Food Sci.*, v.47, p.880-888.
- STEFFE, J. F.; WILLIAMS, J.R.; CHHINNAW, M.S. and BLACK, J.R. (1980). Energy Requirements and Costs of Retort Pouch vs Can Packaging Systems. *Food Tech.*, sep., p.39-43.
- STOFOROS, N. G. (1991). On Ball's Formula Method for Thermal Process Calculations. *J. of Food Eng.*, v.13, p.255-268.
- STUMBO, C.R. (1973). Thermobacteriology in Food Processing. Academic Press Inc. New York, N.Y.
- SWEAT, V. E. & HAUGH, C. G. (1974) A Thermal Conductivity Probe for Small Food Samples. *Transactions of the ASAE*, p.56-58.
- SWEAT, V. E. (1975). Modeling Thermal Conductivity of Meats. *Transactions of the ASAE*, p.564-568.
- SWEAT, V. E. (1985). Thermal Conductivity of Food: Present State of Data. *Transactions of the ASHRAE*, p.299-311.
- SWEAT, V. E.; HAUGH, C. G. & STADELMAN, J. (1973). Thermal Conductivity of Chicken Meat at Temperatures Between -75°C and 20 °C. *J. of Food Sci.*, v.38,p.158-160.

- TANDON, S. and BHOWMIK, S. R. (1986). Evaluation of Thermal Processing of Retortable Pouches Filled with Conduction Heated Foods Considering their Actual Shapes. *J. of Food Sci.*, v.51, n.3, p.709-714.
- TEIXEIRA, A. A., DIXON, J. R., ZAHRADNIK, J. W. & ZINSMEISTER, G. E. (1969a). Computer Determination of Spore Survival Distributions in Thermally-Processed Conduction-Heated Foods. *Food Technology*. vol.23, p.352-354.
- TEIXEIRA, A. A.; DIXON, J.R.; ZAHRADNIK, J.W.; and ZINSMEISTER, G.E. (1969b). Computer Optimization of Nutrient Retention in the Thermal Processing of Conduction-Heated Foods. *Food Technology*. v.23, p.845-850.
- TUNG, M.A. and RAMASWAMY, H. S. (1986). Steam/air Media for Retort Pouch Processing. In *Food Engineering and Process Applications - vol 1*. Ed. M. Lemaguer and P. Jelen. Elsevier Appl. Sci. Publishers.
- VANDERZANT, C. & SPLITTSTOESSER, D. F. (1992). Compendium of Methods for Microbiological Examination of Foods. 3.ed. APHA Technical Committee on Microbiological Methods for Foods.
- VIAJAY, J; SEBBEN, E. and SINGH, R.P. (1995). Specific Heat of Corn Oil during Frying. *IFT Annual Meeting*, p155.
- WANG, DE-QIAN & KOLBE, E. (1990). Thermal Conductivity of Surimi- Measurement and Modeling. *J. of Food Sci.*,55(5)1217-1221.
- WEINTRAUB, S. E.; RAMASWAMY, H. S. and TUNG, M. A. (1989). Heating Rates in Flexible Packages Containing Entrapped Air During Overpressure Processing. *J. of Food Sci.*, v.54, n.6, p.1417-1421.
- WHITAKER, W. C. (1971). Processing Flexible Pouches. *Modern Packaging*, Feb, p.83-88.

ANEXO I

Análise de Variância para avaliar a diferença entre os valores dos coeficientes de película nos tempos de subida, aquecimento e subida+aquecimento.

```
The SAS System
Analysis of Variance Procedure

Source      DF      Anova SS      Mean Square      F Value      Pr > F
TRAT        2      9330.01000000  4665.00500000    2.33         0.1474
REP         5      23146.01833333 4629.20366667    2.31         0.1212
```

The SAS System

Analysis of Variance Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for variable: RES

NOTE: This test controls the type I experimentwise error rate, but generally has a higher type II error rate than REGWQ.

Alpha= 0.05 df= 10 MSE= 2000.01
 Critical Value of Studentized Range= 3.877
 Minimum Significant Difference= 70.78

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	TRAT
A	307.73	6	2
A	299.18	6	3
A	255.73	6	1

ANEXO II

Resultados da análise de variância da regressão linear dos dados experimentais versus modelo das Soluções analíticas para o tempo de aquecimento utilizando-se o SAS.

EXPERIMENTAL vs Sol. Analítica					
Aquecimento 08:27 Thursday, August 28, 1997					
Model: MODEL1					
NOTE: No intercept in model. R-square is redefined.					
Dependent Variable: EXPERIMENTAL					
Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	5316180.8213	5316180.8213	1426077.905	0.0001
Error	476	1774.44869	3.72783		
U Total	477	5317955.27			
Root MSE	1.93076	R-square	0.9997		
Dep Mean	103.51677	Adj R-sq	0.9997		
C.V.	1.86517				
Parameter Estimates					
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T
S.Analit.	1	1.003880	0.00084064	1194.185	0.0001

ANEXO III

Resultados da análise de variância da regressão linear dos dados experimentais versus modelo de Elementos Finitos 2D para o tempo de aquecimento utilizando-se o SAS.

EXPERIMENTAL vs Elem. Finitos 2D					
Aquecimento		08:27 Thursday, August 28, 1997			
Model: MODEL1					
NOTE: No intercept in model. R-square is redefined.					
Dependent Variable: EXPERIMENTAL					
Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	5316370.8602	5316370.8602	1597183.038	0.0001
Error	476	1584.40984	3.32859		
U Total	477	5317955.27			
Root MSE	1.82444	R-square	0.9997		
Dep Mean	103.51677	Adj R-sq	0.9997		
C.V.	1.76246				
Parameter Estimates					
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T
E.F.2D	1	1.002964	0.00079361	1263.797	0.0001

ANEXO IV

Resultados da análise de variância da regressão linear dos dados experimentais versus modelo de Elementos Finitos 3D para o tempo de aquecimento utilizando-se o SAS.

EXPERIMENTAL vs Elem. Finitos 3D

Aquecimento 08:27 Thursday, August 28, 1997

Model: MODEL1

NOTE: No intercept in model. R-square is redefined.

Dependent Variable: EXPERIMENTAL

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	5316823.8891	5316823.8891	2236919.574	0.0001
Error	476	1131.38094	2.37685		
U Total	477	5317955.27			

Root MSE	1.54170	R-square	0.9998
Dep Mean	103.51677	Adj R-sq	0.9998
C.V.	1.48933		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T
EF 3D	1	0.997841	0.00066717	1495.634	0.0001

ANEXO V

Resultados da análise de variância da regressão linear dos dados experimentais versus modelo Empírico para o tempo de aquecimento utilizando-se o SAS.

EXPERIMENTAL vs Empírico					
			Aquecimento 08:27 Thursday, August 28, 1997		
Model: MODEL1					
NOTE: No intercept in model. R-square is redefined.					
Dependent Variable: EXPERIMENTAL					
Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	5312760.2699	5312760.2699	486789.961	0.0001
Error	476	5195.00009	10.91387		
U Total	477	5317955.27			
Root MSE	3.30361	R-square	0.9990		
Dep Mean	103.51677	Adj R-sq	0.9990		
C.V.	3.19138				
Parameter Estimates					
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T
Empírico	1	0.982921	0.00140880	697.703	0.0001

ANEXO VI

Resultados da análise de variância da regressão linear dos dados experimentais versus modelo de Soluções Analíticas para o tempo de resfriamento utilizando-se o SAS.

EXPERIMENTAL vs Sol. Analítica

Resfriamento 08:27 Thursday, August 28, 1997

Model: MODEL1

NOTE: No intercept in model. R-square is redefined.

Dependent Variable: EXPERIMENTAL

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	2653439.4128	2653439.4128	101084.317	0.0001
Error	350	9187.41721	26.24976		
U Total	351	2662626.83			
Root MSE	5.12345	R-square	0.9965		
Dep Mean	84.08746	Adj R-sq	0.9965		
C.V.	6.09300				

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T
S. Analit.	1	0.974798	0.00306600	317.938	0.0001

ANEXO VII

Resultados da análise de variância da regressão linear dos dados experimentais versus modelo de Elementos Finitos 2D para o tempo de resfriamento utilizando-se o SAS.

EXPERIMENTAL vs Elem. Finitos 2D					
resfriamento 08:27 Thursday, August 28, 1997					
Model: MODEL1					
NOTE: No intercept in model. R-square is redefined.					
Dependent Variable: EXPERIMENTAL					
Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	2661456.5211	2661456.5211	795952.065	0.0001
Error	350	1170.30890	3.34374		
U Total	351	2662626.83			
Root MSE	1.82859	R-square	0.9996		
Dep Mean	84.08746	Adj R-sq	0.9996		
C.V.	2.17463				
Parameter Estimates					
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T
EF. 2D	1	0.985593	0.00110472	892.161	0.0001

ANEXO VIII

Resultados da análise de variância da regressão linear dos dados experimentais versus modelo de Elementos Finitos 3D para o tempo de resfriamento utilizando-se o SAS.

EXPERIMENTAL vs Elem. Finitos 3D					
resfriamento 08:27 Thursday, August 28, 1997					
Model: MODEL1					
NOTE: No intercept in model. R-square is redefined.					
Dependent Variable: EXPERIMENTAL					
Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	2661392.6006	2661392.6006	754711.764	0.0001
Error	350	1234.22935	3.52637		
U Total	351	2662626.83			
Root MSE		1.87786	R-square	0.9995	
Dep Mean		84.08746	Adj R-sq	0.9995	
C.V.		2.23323			
Parameter Estimates					
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T
EF 3D	1	0.986699	0.00113578	868.741	0.0001

ANEXO IX

Resultados da análise de variância da regressão linear dos dados experimentais versus modelo de Empírico para o tempo de resfriamento utilizando-se o SAS.

EXPERIMENTAL vs Empírico					
resfriamento 08:27 Thursday, August 28, 1997					
Model: MODEL1					
NOTE: No intercept in model. R-square is redefined.					
Dependent Variable: EXPERIMENTAL					
Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	2658906.1606	2658906.1606	250120.891	0.0001
Error	350	3720.66944	10.63048		
U Total	351	2662626.83			
Root MSE	3.26044	R-square	0.9986		
Dep Mean	84.08746	Adj R-sq	0.9986		
C.V.	3.87744				
Parameter Estimates					
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T
Empirico	1	1.008643	0.00201680	500.121	0.0001

ANEXO X

{Este Programa escrito em PASCAL (Turbo 7.0) utiliza soluções analíticas das equações de Fourier para estimar a temperatura a cada 30 segundos no centro e mais quatro posições eqüidistantes até a superfície de uma placa plana finita sujeita a aquecimento por convecção por todas as faces.

A Subrotina CALCBETA calcula as 15 primeiras raízes da equação $B \tanh B = Bi$
Os parâmetros de entrada solicitados pelo programa via teclado são:

Conductividade termica (W/mC)
Calor especifico (Kj/KgC)
Densidade (kg/m3)
Coeficiente de Pelicula de aquecimento(W/m2K)
Coeficiente de Pelicula de resfriamento(W/m2K)
Bolsaespessura (m)
 largura (m)
 comprimento(m)
Temperatura inicial (C)
Temperatura do meio de aquecimento (C)
Temperatura do meio de resfriamento (C)
Tempo de aquecimento (min)
Tempo de resfriamento (min)
Obs: apenas as variáveis de tempo são inteiras

A Saída será em um arquivo denominado pelo usuario

O programa necessita 40kB de disco rígido.

Tempo de execucao aproximado de 20min para 40min de processo
em um PC com processador Penthium 166mhz 32 Mb RAN}

```
PROGRAM PERFIL3;
```

```
{ $N+,E+ }
```

```
Uses CRT;
```

```
Var biot,h,hr,k,cp,Ti,Tb,Tr,E,L,C,alfa,Fo,d,U,Up,di,t,XII:real;
```

```
  a:char;
```

```
  i,ii,ji,j,jj,jk,n,tempo,tempos,tempor:integer;
```

```
  betas: array[1..30] of real;
```

```
  T1: array[0..600,0..10] of real;
```

```
  nome : string[14];
```

```
  Tuni : text;
```

```
Procedure Stope;
```

```
var a:char;
```

```
  begin
```

```
    write('press any key..');
```

```
    a:=readkey;
```

```
  end;
```

```
Procedure altera;
```

```
Begin
```

```
Clrscr;
```

```
writeln; writeln;writeln;
```

```
  Write(' Conduktividade termica (W/mC) : ');readln(k);
```

```

Write(' Calor especifico (kj/kgC)   : ');readln(cp);
Write(' Densidade (kg/m3)         : ');readln(d);
Write(' Coeficiente de Pelicula de aquecimento(W/m2K): ');readln(h);
Write(' Coeficiente de Pelicula de resfriamento(W/m2K): ');readln(hr);
Write(' Bolsa     ....espessura (m) : ');readln(e);
write('          largura (m) : ');readln(l);
write('          comprimento(m): ');readln(c);
Write(' Temperatura inicial (C) : ');readln(Ti);
Write(' Temperatura do meio de aquecimento (C) : ');readln(Tb);
Write(' Temperatura do meio de resfriamento (C) : ');readln(Tr);
Write(' Tempo de aquecimento (min)   : ');readln(tempo);
Write(' Tempo de resfriamento (min)  : ');readln(tempor);
writeln;writeln;write('   Confirma (S/N)? ');
a:=readkey;
  If a='n' then altera;
end;

```

```

Procedure calcBeta(B:real;num:integer);

```

```

  Var b1,b2,b11,b22,bm,bmm,beta,inc: real;
  Function btanb(be:real):real;
  begin
    btanb:=(be*sin(be)/cos(be))-B;
  end;

```

```

Begin
  for i:=1 to 15 do
  begin
    if i=1 then beta:=0.0
    else beta:=bm;
    b1:=beta;
    b2:=b1+0.01;
    b11:= btanb(b1);
    b22:= btanb(b2);
    while b11>0 do begin
      b1:=b1+0.001;
      b11:=btanb(b1);
    end;
    while b22>0 do begin
      b2:=b2+0.001;
      b22:=btanb(b2);
    end;
    while (b11*b22) > 0 do
    begin
      b2:=b2+0.001;
      b22:= btanb(b2);
    end;
    b1:=b2-0.001;
    bm:=(b1+b2)/2;
    bmm:=btanb(bm); b11:=btanb(b1);
    while abs(bmm)>0.0001 do

```

```

begin
  if bmm*b11>0 then
    begin
      b1:=bm;
      bm:=(b1+b2)/2;
      b11:=btanb(b1);
    end
  else
    begin
      b2:=bm;
      bm:=(b1+b2)/2;
      b22:= btanb(b2);
    end;
    bmm:=btanb(bm);
  end;
  betas[i]:=bm;
end;
end;

```

```
PROCEDURE UNIDIM(XI:real);
```

```

Var Uo,R,S,RS:double;
    i,j,ij:integer;

```

```
Begin
```

```

    U:= 0.0;
    for ij:= 1 to 15 do
      begin
        R:= (2*sin(betas[ij]))/(betas[ij]+sin(betas[ij])*cos(betas[ij]));
        S:= sqr(betas[ij]);
        Uo:=R*exp(-s*Fo)*cos(sqrt(S)*XI);
        U:=U+Uo;
      end;

```

```
end;
```

```
Begin
```

```

  Clrscr;
  altera;
  clrscr;
  alfa:=k/(d*cp);
  tempos:=tempo*60;
  for jj:=0 to 4 do
    begin
      XII:=jj*0.25;
      ii:=0;
      ji:=1;
      while ii<=tempos do
        begin
          Up:=1;
          di:=e;

```

```

Fo:=alfa*ii/sqr(di/2);
biot:=h*(di/2)/k;
calcbeta(biot,14);
unidim(XII);
Up:=U*Up;
di:=L;
Fo:=alfa*ii/sqr(di/2);
biot:=h*(di/2)/k;
calcbeta(biot,14);
unidim(0);
Up:=U*Up;
di:=c;
Fo:=alfa*ii/sqr(di/2);
biot:=h*(di/2)/k;
calcbeta(biot,14);
unidim(0);
Up:=U*Up;
T1[ji,jj]:=Up*(Ti-Tb)+Tb;
ii:=ii+30;
ji:=ji+1;write('*');
end;
end;
for jj:=0 to 4 do T1[1,jj]:=Ti;
h:=hr;
Tb:=Tr;
Ti:=T1[ji-1,0];
tempos:=tempor*60;
for jj:=0 to 4 do
begin
XII:=jj*0.25;
ii:=0;
jk:=ji;
while ii<=tempos do
begin
Up:=1;
di:=e;
Fo:=alfa*ii/sqr(di/2);
biot:=h*(di/2)/k;
calcbeta(biot,14);
unidim(XII);
Up:=U*Up;
di:=L;
Fo:=alfa*ii/sqr(di/2);
biot:=h*(di/2)/k;
calcbeta(biot,14);
unidim(0);
Up:=U*Up;
di:=c;
Fo:=alfa*ii/sqr(di/2);
biot:=h*(di/2)/k;
calcbeta(biot,14);

```

```
    unidim(0);
    Up:=U*Up;
    T1[jk,jj]:=Up*(Ti-Tb)+Tb;
    ii:=ii+30;
    jk:=jk+1;write('*');
  end;
end;
clrscr;
write('Nome do arquivo de saida : ');
readln(nome);

Assign(Tuni,nome);rewrite(Tuni);
for i:=1 to (2*(tempo+tempor)+1) do begin
  write(tuni,(i*30)-30);
  for j:=0 to 4 do
    write(Tuni,t1[i,j]:9:2);
    writeln(tuni);
  end;
  close(tuni); stop;
end.
```

ANEXO XI

```

! Esta Macro estima a temperatura no centro de uma bolsa
! de dimensões 0,019mx0,19mx0,18m através do método de
! elementos finitos, considerando o modelo tridimensional
! utilizando-se o ANSYS 5.3.
! O arquivo bolsa_3d.db deve estar no diretório de trabalho
! do ANSYS junto com a macro.
! O programa requisita os parâmetros de entrada via teclado:
! - Arquivo de dados: um arquivo texto em coluna contendo as
!   temperaturas da autoclave nos tempos inicial, 420s,
!   1740s, 1800, 1920, 2040, 2160, 2280, 2400, 2520, 2640,
!   2760, 2880, 2940
! - temperatura inicial do produto (C)
! - Densidade (kg/m3)
! - Calor específico (kJ/kgC)
! - Condutividade térmica (W/mC)
! - Coeficiente de película (W/m2K)
! A saída do programa lista as temperaturas a cada 15
! segundos em num arquivo texto de mesmo nome do arquivo de
! entrada com extensão .tm0
! O ANSYS requer aprox. 500Mb de disco rígido e 32Mb RAN para
! execucao
! Esta macro demora cerca de 25 min para ser executada em um
! PC com processador Penthiun 166 Mhz e 32 Mb RAN

```

```

resume,bolsa_3d,db,,0
/solu
*dim,tin,,44
*dim,tm,,200
*dim,tm1,,200
*dim,tm2,,200
*ask,arqtin, temp refri,arqtin
*vread,tin(1),arqtin,res
(1F5.1)
*ask,To, Temperatura inicial...,To
*ask,d, Densidade...,d
*ask,cp, Calor especifico...,cp
*ask,k, Condutividade...,k
*ask,h, coeficiente de pelicula...,h
uimp,1,DENS,,,d,
uimp,1,KXX,,,k,
uimp,1,c,,,cp,
tunif,To
asel,s,area, ,1,2
OUTPR,all,
outres,all,all,
kbc,1
time,0.00001
sfa,all,1,conv,h,tin(1),
autots,of
deltim,15,0,0,0

```

```
lswrite,1
time,420
kbc,0
sfa,all,1,conv,h,tin(2),
lswrite,2
time,1740
sfa,all,1,conv,h,tin(3),
lswrite,3
time,1800
sfa,all,1,conv,h,tin(4),
lswrite,4
time,1920
sfa,all,1,conv,h,tin(8),
lswrite,5
time,2040
sfa,all,1,conv,h,tin(12),
lswrite,6
time,2160
sfa,all,1,conv,h,tin(16),
lswrite,7
time,2280
sfa,all,1,conv,h,tin(20),
lswrite,8
time,2400
sfa,all,1,conv,h,tin(24),
lswrite,9
time,2520
sfa,all,1,conv,h,tin(28),
lswrite,10
time,2640
sfa,all,1,conv,h,tin(32),
lswrite,11
time,2760
sfa,all,1,conv,h,tin(36),
lswrite,12
time,2880
sfa,all,1,conv,h,tin(40),
lswrite,13
time,2940
sfa,all,1,conv,h,tin(42),
lswrite,14
lssolve,1,14,1
/post26
nsol,2,6102,temp,,
lines,300
vget,tm(1),2
*cfopen,arqtin,tm0
*vwrite,tm(1),,,,,,,,,
(lf5.1)
*cfclos
```

ANEXO XII

! Esta Macro estima a temperatura no centro de uma bolsa
! de dimensões 0,019mx0,19mx0,18m através do método de
! elementos finitos, considerando o modelo bidimensional
! utilizando-se o ANSYS 5.3.
! O arquivo bolsa_2d.db deve estar no diretório de trabalho
! do ANSYS junto com a macro.
! O programa requisita os parâmetros de entrada via teclado:
! - Arquivo de dados: um arquivo texto em coluna contendo as
! temperaturas da autoclave nos tempos inicial, 420s,
! 1740s, 1800, 1920, 2040, 2160, 2280, 2400, 2520, 2640,
! 2760, 2880, 2940
! - temperatura inicial do produto (C)
! - Densidade (kg/m³)
! - Calor específico (kJ/kgC)
! - Condutividade térmica (W/mC)
! - Coeficiente de película (W/m²K)
! A saída do programa lista as temperaturas a cada 15
! segundos em num arquivo texto de mesmo nome do arquivo de
! entrada com extensão .tm0
! O ANSYS requer aprox. 500Mb de disco rígido e 32Mb RAN para
! execução
! Esta macro demora cerca de 10 min para ser executada em um
! PC com processador Penthiun 166 Mhz e 32 Mb RAN

```

resume,bolsa_2d,db,,0
/solu
*dim,tin,,44
*dim,tm,,200
*ask,arqtin, temp refri,arqtin
*vread,tin(1),arqtin,res
(1F5.1)
*ask,To, Temperatura inicial..,To
*ask,d, Densidade..,d
*ask,cp, Calor especifico..,cp
*ask,k, Condutividade..,k
*ask,h, coeficiente de pelicula..,h
uimp,1,DENS,,d,
uimp,1,KXX,,k,
uimp,1,c,,cp,
tunif,To
lselect,s,line, ,1,2
OUTPR,all,
outres,all,all,
kbc,1
time,0.00001
sfl,all,conv,h, ,tin(1), ,
autots,on
deltim,1,0,0,0
lswrite,1

```

```
time,420
kbc,0
sfa,all,1,conv,h,tin(2),
lswrite,2
time,1740
sfa,all,1,conv,h,tin(3),
lswrite,3
time,1800
sfa,all,1,conv,h,tin(4),
lswrite,4
time,1920
sfa,all,1,conv,h,tin(8),
lswrite,5
time,2040
sfa,all,1,conv,h,tin(12),
lswrite,6
time,2160
sfa,all,1,conv,h,tin(16),
lswrite,7
time,2280
sfa,all,1,conv,h,tin(20),
lswrite,8
time,2400
sfa,all,1,conv,h,tin(24),
lswrite,9
time,2520
sfa,all,1,conv,h,tin(28),
lswrite,10
time,2640
sfa,all,1,conv,h,tin(32),
lswrite,11
time,2760
sfa,all,1,conv,h,tin(36),
lswrite,12
time,2880
sfa,all,1,conv,h,tin(40),
lswrite,13
time,2940
sfa,all,1,conv,h,tin(42),
lswrite,14
lssolve,1,14,1
/post26
nsol,2,6102,temp,,
lines,300
vget,tm(1),2
*cfopen,arqtin,tm0
*vwrite,tm(1),,,,,,,,,
(1f5.1)
*cfclos
```

ANEXO XIII

```
Program calc_aga;
```

```
 {$N+,E+}
```

```
 Uses CRT;
```

{Este Programa estima o coeficiente convectivo de transferencia de calor no come up, periodo de aquecimento, come-up + aquecimento e resfriamento, numa autoclave tipo Allpax para uma placa plana sujeita a aquecimento por todos os lados.

O programam utiliza um metodo de minimos quadrados para otimizar temperaturas experimentais medidas no centro da placa contra aquelas geradas pelas equacoes de transferencia de calor de Fourier.

A Subrotina CALCBETA calcula as 15 primeiras raizes da equacao

```
 B tang B=Bi
```

Os parametros de entrada solicitados pelo programa via teclado sao:

```
 Condutividade termica (W/mC)
```

```
 Calor especifico (Kj/KgC)
```

```
 Densidade (Kg/m3)
```

```
 Bolsa ....espessura (m)
```

```
 Temperatura inicial (C)
```

```
 Temperatura do meio de aquecimento (C)
```

```
 Temperatura do meio de resfriamento (C)
```

```
 Tempo de come-up (min)
```

```
 Tempo de aquecimento (min)
```

```
 Tempo de resfriamento (min)
```

Obs: apenas as variaveis de tempo sao inteiras

As saidas sao na tela

o arquivo de entrada (digitado no corpo do programa linha 176)

deve ser tipo texto com os valores das temperaturas

(a cada minuto) escritos em uma so linha)

Este programa necessita 40Kb de disco rigido

```
Var
```

```
  arq,tuni: text;
```

```
  nome : string[14];
```

```
  biot,h,k,cp,Ti,Tb,Tw,E,L,C,alfa,d,h1,h2,fh,fc,w:real;
```

```
  tcu,taq,trf:integer;
```

```
  s2,s1,sm,slop,R2,r21,r22:real;
```

```
  a:char;
```

```
  i,j,iter,pa,ini,fim,kk,tempo:integer;
```

```
  SXY,SX2,SY,SX,SY2:real;
```

```
  T1,T2,Tm,TF,TT: array[0..600] of real;
```

```
Procedure Stope;
```

```
var a:char;
```

```
begin
```

```
  write('press any key..');
```

```
  a:=readkey;
```

```
end;
```

```
PROCEDURE UNIDIM(Var hh:real;ini,fim:integer);
```

```

Var t,XI,Uo,U,Fo,R,S,BI:real;
    i,ij,n:integer;
    betas: array[0..30] of real;

Procedure calcBeta(B:real);
    Var b1,b2,b11,b22,bm,bmm,beta,inc: real;
        i:integer;

Function btanb(be:real):real;
    begin
        btanb:=(be*sin(be)/cos(be))-B;
    end;

Begin
    for i:=0 to 14 do
        begin
            if i=0 then beta:=0.0
            else beta:=bm;
            b1:=beta;
            b2:=b1+0.01;
            b11:= btanb(b1);
            b22:= btanb(b2);
            while b11>0 do begin
                b1:=b1+0.001;
                b11:=btanb(b1);
            end;
            while b22>0 do begin
                b2:=b2+0.001;
                b22:=btanb(b2);
            end;
            while (b11*b22) > 0 do
                begin
                    b2:=b2+0.001;
                    b22:= btanb(b2);
                end;
            b1:=b2-0.001;
            bm:=(b1+b2)/2;
            bmm:=btanb(bm); b11:=btanb(b1);
            while abs(bmm)>0.0001 do
                begin
                    if bmm*b11>0 then
                        begin
                            b1:=bm;
                            bm:=(b1+b2)/2;
                            b11:=btanb(b1);
                        end
                    else
                        begin
                            b2:=bm;
                            bm:=(b1+b2)/2;
                            b22:= btanb(b2);
                        end;
                    bmm:=btanb(bm);
                end;
            betas[i]:=bm;
        end;
    end;

Begin

```

```

BI:=hh*(E/2)/k;
Calcbeta (BI);
for i:=ini to fim do
begin
  t:= i*60;
  Fo:=alfa*t/sqr(E/2);
  U:= 0.0;
  for ij:= 0 to 14 do
  begin
    R:=
(2*sin(betas[ij]))/(betas[ij]+sin(betas[ij])*cos(betas[ij]));
    S:= sqr(betas[ij]);
    Uo:=R*exp(-s*Fo);
    U:=U+Uo;
  end;
  TT[i]:=U*(Ti-Tb)+Tb;
end;
TT[0]:=Ti;
end;
Procedure calcslope;
Var
  i,j:integer;

begin
  SXY:=0.0;
  SX2:=0.0;
  SX:=0.0;
  SY:=0.0;
  SY2:=0.0;
  for i:=ini to fim do
  begin
    if kk=4 then j:=tcu+taq+i
    else j:=i;
    SXY:=SXY + TT[i]*TF[j];
    SX2:=SX2 + TT[i]*TT[i];
    SX:=SX + TT[i];
    SY:=SY + TF[j];
    SY2:=SY2 + TF[j]*TF[j];
  end;
  slop:=SXY/SX2;
  R21:=((fim-ini+1)*SXY-(SX*SY));
  R22:=sqrt(((fim-ini+1)*sx2-sqr(SX))*((fim-ini+1)*SY2-sqr(SY)));
  R2:=R21/r22;
end;
Begin

  clrscr;

  Writeln(' parametros de entrada (Unidades em
SI)...');writeln;writeln;
  Write(' Condutividade termica      ');readln(k);
  Write(' Calor especifico          : ');readln(cp);
  Write(' Densidade      : ');readln(d);
  Write(' Bolsa      ....espessura    : ');readln(e);
  Write(' Temperatura inicial do produto : ');readln(ti);
  Write(' Temperatura do meio de aquecimento : ');readln(tb);
  Write(' Temperatura do meio de resfriamento : ');readln(tw);
  Write(' Valor de fh : ');readln(fh);
  Write(' Valor de fc : ');readln(fc);
  Write(' Tempo de come-up : ');readln(tcu);

```

```

Write(' Tempo de aquecimento : ');readln(taq);
Write(' Tempo de resfriamento : ');readln(trf);
Clrscr;
Assign(arq, 'p4b9.tem');
alfa:=k/(d*cp);
clrscr;
reset(arq);
tempo:=tcu+taq+trf;
for i:=0 to tempo do read(arq,TF[i]);close(arq);clrscr;
ini:=0;
fim:=tcu;
For kk:=1 to 3 do
Begin
h1:=sqrt(2.303/(alfa*fh*60));
h2:=sqrt(2.303*(e/2)*(e/2)/(alfa*fh*60));
h:=k*h1*ABS(sin(h2)/cos(h2));
h2:=h*1.5;
h1:=h*0.5;
if kk=2 then begin
ini:=fim+1;
fim:=fim+taq;
end;
if kk=3 then begin
ini:=0;
fim:=tcu+taq;
end;

unidim(h,ini,fim);
Calcslope;
sm:=slop;
unidim(h1,ini,fim);
Calcslope;
s1:=slop;
unidim(h2,ini,fim);
Calcslope;
s2:=slop;
iter:=0;
clrscr; writeln;writeln;
if kk=1 then writeln('calculando o valor de h no come-
up.....')
else if kk=2 then writeln('calculando o valor de h no periodo
de aquecimento...')
else if kk=3 then writeln('calculando o valor de h em come-
up + aquecimento...');

writeln;writeln;Write(' aguarde!! esta operacao pode levar
alguns minutos');
writeln;writeln;
writeln;
writeln('Numero de iteracoes valor h inclinacao R2');
Writeln('-----');
while (abs(sm-1) > 0.0001) and (iter <> 10) do
begin
iter:=iter+1;writeln(' ',iter,' ',h:5:2,'
',sm:7:4,' ',r2:7:4);
if s1 > 1.0 then
begin
if sm < 1.0 then
begin

```

```

        h2:=h;
        h:=(h2+h1)/2;
    end

    else
        begin
            h1:=h;
            h:=(h2+h1)/2;
        end;
    end
end
else
begin
    h:=h1;
    h2:=h*1.5;
    h1:=h*0.5;
end;
unidim(h,ini,fim);
Calcslope;
sm:=slop;
unidim(h1,ini,fim);
Calcslope;
s1:=slop;
unidim(h2,ini,fim);
Calcslope;
s2:=slop;
end;
writeln;writeln;
write('o valor de h e ... ',h:5:2,' ',sm:7:4,'
',r2:7:4);writeln;
writeln;
stope;clrscr;
end;
clrscr;
{Resfriamento}
kk:=4;
ti:=Tf[fim];clrscr;
tb:=tw;
ini:=1;
fim:=trf;
h1:=sqrt(2.303/(alfa*fc));
h2:=sqrt(2.303*(e/2)*(e/2)/(alfa*fc));
h:=k*h1*abs(sin(h2)/cos(h2));
h1:=h*0.5;
h2:=h*1.5;
unidim(h,ini,fim);
Calcslope;
sm:=slop;
unidim(h1,ini,fim);
Calcslope;
s1:=slop;
unidim(h2,ini,fim);
Calcslope;
s2:=slop;
writeln;writeln;Write(' aguarde!! esta operacao pode levar
alguns minutos');
writeln;writeln;
writeln;Write('          Calculando h no
resfriamento.....');writeln;writeln;
writeln;iter:=0;
writeln('Numero de iteracoes   valor h      inclinacao   R2');

```

```

WriteIn('-----');
while (abs(sm-1) > 0.0001) and (iter <> 9) do
begin
  iter:=iter+1;writeIn('          ',iter,'          ',h:5:2,'
',sm:7:4,'          ',r2:7:4);
  if s1 < 1.0 then
    begin
      if sm > 1.0 then
        begin
          h2:=h;
          h:=(h2+h1)/2;
        end
      else
        begin
          h1:=h;
          h:=(h2+h1)/2;
        end;
    end
  else
    begin
      h:=h1;
      h1:=h*0.5;
      h2:=h*1.5;
    end;
  unidim(h,ini,fim);
  Calcslope;
  sm:=slop;
  unidim(h1,ini,fim);
  Calcslope;
  s1:=slop;
  unidim(h2,ini,fim);
  Calcslope;
  s2:=slop;
end;
writeIn;writeIn;Write(' O valor de h e ',h:5:2,'
',sm:7:4,'          ',r2:7:4);writeIn;stope;
close(arq);
end.

```

ANEXO XIV

! Esta macro utiliza as temperaturas medias de cada elemento (media[i,j]) em intervalos de tempo de 1 minuto e calcula o valor de esterilização media da massa da bolsa ao longo do tempo

```

/post1
*dim, F, array, 50
*dim, C, array, 882
*do, i, 1, 882
  C(i)=100
*enddo
etable, ve, volu
  *do, i, 1, 49, 1
    CT=0
    *do, j, 1, 882
      D=0.21*10**((121.1-media(j,i))/10)
      Co=C(j)
      C(j)=Co*10**(-1/D)
      *get, vol, elem, j, etab, ve
      CT=CT+vol*C(j)
    *enddo
    F(i)=0.21*log10((100*0.107415e-3)/CT)
  *enddo
*dim, FP, array, 882
*do, i, 1, 882
  *get, vol, elem, i, etab, ve
  fp(i)=0.21*log10((100*vol/c(i)*vol))
*enddo

```