

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

MODELAMENTO MATEMÁTICO DE ALIMENTOS COM PARTICULADOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Frampton Franklin Santana
Engenheiro de Alimentos

Prof. Dr. Marcelo Cristianini
Orientador

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Alimentos

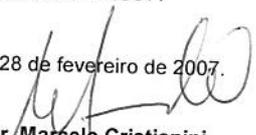
Campinas, SP

2007

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por **Frampton Franklin Santana** aprovado pela Comissão Julgadora em 28 de fevereiro de 2007.

Campinas, 28 de fevereiro de 2007.


Prof. Dr. Marcelo Cristianini
Presidente da Banca

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
CÉSAR LATTES
DESENVOLVIMENTO DE COLEÇÃO

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA:	T/UNICAMP
	Sa59m
V. _____	Ed. _____
TOMBO BC:	72197
PROC.	16-145-0f
C <input type="checkbox"/>	D <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	11,00
DATA	26/04/0f
BIB-ID	411893

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA FEA – UNICAMP

Sa59m	<p>Santana, Frampton Franklin Modelamento matemático de alimentos com particulados pelo método dos elementos finitos / Frampton Franklin Santana. -- Campinas, SP: [s.n.], 2007.</p> <p>Orientador: Marcelo Cristianini Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos</p> <p>1. Modelos matemáticos. 2. Esterilização. 3. Método dos elementos finitos. 4. Alimentos particulados. 5. Autoclaves. I. Cristianini, Marcelo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">(cars/fea)</p>
-------	--

Titulo em inglês: Mathematical model of particulate food by finite element method
Palavras-chave em inglês (Keywords): Mathematical model, Sterilization, Finite element method
Particulate food, Retort

Titulação: Mestre em Tecnologia de Alimentos

Banca examinadora: Marcelo Cristianini
Pilar Rodriguez de Massaguer
Flávio Luís Schmidt
Kil Jin Park

Programa de Pós Graduação: Programa em Tecnologia de Alimentos

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Marcelo Cristianini
Orientador
FEA – UNICAMP



Prof. Dr. Pilar Rodriguez de Massagué
FEA – UNICAMP



Prof. Dr. Flávio Luís Schmidt
FEA – UNICAMP

Prof. Dr. Kil Jin Park
FEAGRI – UNICAMP

200418318

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Marcelo Cristianini pela orientação, paciência e pela oportunidade.

À Janaina, meu grande amor, pelo incentivo, apoio e por estar sempre ao meu lado em todos os momentos difíceis.

À professora Dr^a. Pilar Rodriguez de Massaguer pela valiosa colaboração.

Aos professores Dr. Kil Jin Park e Dr. Flávio Luís Schmidt pelas sugestões à redação final da tese.

Aos colegas de pós graduação Claudia Pinho, Izael Gressoni e Raquel Manhani. Considero-os anjos que apareceram em momentos de muita dificuldade.

À inestimável ajuda de Ana Lourdes e Bernadete, pela colaboração no laboratório de microbiologia. E ainda aos técnicos Judite e Renata.

Aos estimados amigos André Marangoni (que pelo menos está fazendo alguma coisa) e Ricardo Ucles (não te disse?) pela amizade e apoio.

À Masterfoods do Brasil, representada por Silvia Pereira, pela oportunidade e pelas amostras de alimentos para cães e gatos.

Aos amigos Geferson Cunha, Charles Tognoni, Darlan Santos e Salatir, pela ajuda nas análises.

A Deus, por que *até este momento nos ajudou o Senhor... (I Samuel 7:12b)*

RESUMO

Neste trabalho foi elaborado um modelo matemático do processo de transferência de calor durante a esterilização de um alimento condutivo para cães e gatos (petfood) embalado em bolsas flexíveis esterilizáveis. O modelo utilizou a técnica de elementos finitos para a resolução das equações diferenciais de transferência de calor, considerando as propriedades térmicas de cubos de carne manufacturados imersos em uma matriz carne, além da temperatura inicial da amostra e do perfil real de temperatura da autoclave durante o processo de esterilização como condições de contorno. Condutividade térmica, calor específico, densidade e difusividade térmica foram determinadas experimentalmente e os valores encontrados para os cubos de carne manufacturados foram respectivamente 0,34 W/m°C, 2,91 kJ/kg°C, 1082,9 kg/m³ e 1,08 x 10⁻⁷ m²/s, enquanto que para a matriz carne, os valores obtidos foram respectivamente 0,46 W/m°C, 3,41 kJ/kg°C, 1002,0 kg/m³ e 1,36 x 10⁻⁷ m²/s. O valor do coeficiente convectivo de transferência de calor (h) foi calculado a partir de perfis tempo x Temperatura obtidos experimentalmente. O processo foi dividido em quatro fases: início do *come up*, tempo de Ball (correspondente a 42% do CUT + aquecimento), início de resfriamento e final de resfriamento. Com os valores de h calculados, o modelo de distribuição de temperatura no interior da embalagem foi validado experimentalmente através da realização de ensaios a 121°C. Foram determinados os valores de D e z do *Clostridium sporogenes* para os cubos de carne e para a matriz carne. Os valores de D a 110, 115 e 118 °C para os cubos de carne foram 20,70, 9,76 e 6,07 minutos, respectivamente. O Valor de z encontrado foi de 15,04°C. Para a matriz carne, os valores de D a 110, 115 e 118 °C foram 20,33, 9,45 e 6,29 minutos, respectivamente. O Valor de z encontrado foi de 15,63°C. A partir da distribuição de temperatura no interior da embalagem fornecida pelo modelo, foi estimada a destruição térmica de microrganismos. O cálculo da destruição térmica de microrganismos foi realizada através da determinação da Esterilidade Média da Massa. Foram realizados ensaios de validação do modelo de destruição microbiológica submetendo-se amostras

inoculadas com *Clostridium sporogenes* a processamentos sub-letais a 110 e 115°C. O número de reduções decimais obtidas em cada um dos processos foi confrontado com a destruição prevista pelo modelo, que utilizou os valores de D e z obtidos experimentalmente. Nos processos a 110°C o desvio entre valores previstos e valores obtidos experimentalmente foi sempre inferior a 24,7% e naqueles realizados a 115°C este desvio foi sempre inferior a 11,0 %.

ABSTRACT

A heat transfer mathematical model during the sterilization process of pet food in retortable pouches was built. The model was built using the finite element technique. The model considered the thermal properties of meaty manufactured chunks and meat loaf individually. The sample initial temperature and the retort real temperature profile were the boundary conditions applied. Thermal conductivity, specific heat, density and thermal diffusivity of meaty manufactured chunks and meat loaf was experimentally determined. The obtained values for meaty manufactured chunks were 0,34 W/m°C, 2,91 kJ/kg°C, 1082,9 kg/m³ and $1,08 \times 10^{-7}$ m²/s, respectively. The obtained values for the meat loaf was 0,46 W/m°C, 3,41 kJ/kg°C, 1002,0 kg/m³ and $1,36 \times 10^{-7}$ m²/s, respectively. The value of the heat transfer coefficient (h) was calculated from time-temperature profile obtained experimentally. The thermal process was divided into 4 parts: Come up Time, Ball's time (corresponding to 42% CUT and heating phase, beginning of cooling and end of cooling. The heat transfer model of the sterilization process was experimentally validated through processes carried out at 121°C. The linear regression between temperature profiles generated by the models and the ones experimentally obtained, showed that they were in good agreement, ($R^2 = 0,9965$, slope = 0,9907) showing that the model was able to predict satisfactorily temperature distribution into the sample during sterilization process. Thermal death parameters D and z, of *Clostridium sporogenes* in pet food were determined. For meaty manufactured chunks, the results obtained for D value at 110, 115 and 118°C were 21,6, 9,5 e 6,3 minutes, respectively. The z value obtained was 15,04°C. For meat loaf, the results obtained for D value at 110, 115 and 118°C were 20,70 9,76 6,29min, respectively. The z value obtained was 15,63°C. The mass average sterilization value was estimated and experimental processes were carried out at 110 and 115°C in order to validate the microbiological destruction model. In these processes, inoculated samples of pet food were submitted to sub lethal processes and the experimental microbiological destruction was determined and compared with the values estimated by the model. The results showed that for

processes at 110°C the differences between experimental and predicted results were less than 24,7% and for those processes at 115°C this differences were less than 11,0%.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivo Geral.....	5
2.2 Objetivos Específicos	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 Processamento Térmico	6
3.1.1 Processamento Térmico de Alimentos	6
3.1.2 O uso de Bolsas Flexíveis no Processamento Térmico de Alimentos ..	7
3.2 Modelamento Matemático em Processos de Esterilização de Alimentos	9
3.3 Propriedades Térmicas.....	12
3.3.1 Condutividade Térmica	12
3.3.2 Calor Específico.....	13
3.3.3 Difusividade Térmica	14
3.4 Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor.....	15
3.5 O Método de Elementos Finitos.....	16
3.5.1 A Aplicação do Método de Elementos Finitos no Processamento Térmico de Alimentos	22
3.6 Utilização de Esporos Bacterianos no Monitoramento do Processamento Térmico de Alimentos	25
3.6.1 O <i>Clostridium sporogenes</i>	28
4 MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1 Fluxograma do trabalho realizado	31
4.2 Caracterização da Amostra	32
4.2.1 Análises de Composição Centesimal do Produto	33
4.2.2 Determinação da Carga Microbiana Inicial	33
4.2.3 Determinação das Propriedades Térmicas.....	33
4.2.3.1 Condutividade Térmica (k).....	34

4.2.3.2	Densidade (ρ)	36
4.2.3.3	Difusividade Térmica(α).....	36
4.2.3.4	Calor Específico (c_p)	39
4.3	Equipamentos, Determinação de Parâmetros e Processos Realizados	39
4.3.1	Autoclave	39
4.3.2	Preparo das Amostras para o Processamento	41
4.3.3	Determinação do Volume de Ar Residual nas Embalagens	44
4.3.4	Calibração dos Termopares.....	45
4.3.5	Estudo da Distribuição de Temperaturas na Região da Autoclave Utilizada nos Ensaios	45
4.3.6	Determinação do Coeficiente Convectivo Global de Transferência de Calor	47
4.3.6.1	O Método <i>Sub Problem Approximation</i>	48
4.3.7	Determinação do Ponto Frio da Embalagem.....	50
4.3.8	Determinação da Temperatura no Interior da Embalagem	51
4.3.9	Ensaios de Penetração de Calor nas Embalagens Fléxíveis.....	52
4.3.10	Determinação dos Parâmetros D e z	53
4.3.11	Cálculo da Esterilização Média da Massa	55
4.4	Modelamento Matemático do Perfil de Temperatura no Interior da Embalagem	56
4.5	Ensaios de Validação do Modelo de Destruição Microbiológica.....	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
5.1	Caracterização da Amostra	62
5.1.1	Composição Centesimal do Produto	62
5.1.2	Carga Microbiana Inicial	63
5.1.3	Propriedades Térmicas.....	64
5.1.3.1	Condutividade Térmica (k).....	64
5.1.3.2	Densidade (ρ)	66
5.1.3.3	Difusividade Térmica (α).....	68
5.1.3.4	Calor Específico (c_p)	69

5.2 Equipamentos, Determinação de Parâmetros e Processos Realizados	71
5.2.1 Determinação do Volume de Ar Residual nas Embalagens	71
5.2.2 Estudo da Distribuição de Temperaturas na Região da Autoclave Utilizada nos Ensaios	72
5.2.3 Determinação do Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor..	75
5.2.4 Determinação do Ponto Frio da Embalagem	77
5.2.5 Determinação dos Parâmetros de Penetração de Calor.....	78
5.2.6 Determinação dos Parâmetros D e z.....	81
5.3 Modelamento Matemático do Perfil de Temperatura no Interior da Embalagem	88
5.3.1 Validação do Modelo de Temperatura	88
5.3.2 Validação do Modelo de Destruição Microbiológica	92
6 CONCLUSÕES.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS.....	110

1 INTRODUÇÃO

O mercado de alimentos para animais de estimação (*petfood*) no Brasil é um dos mais promissores dos últimos dez anos, com taxa média anual de crescimento de 10% ao ano (FARACO; SEMINOTTI, 2004). O Brasil é o segundo maior produtor de alimento para animais de estimação e se tornou nos últimos anos um importante competidor no mercado internacional (BRAZIL..., 2004). Estima-se que a população brasileira de cães seja de 28 milhões e a de gatos de 12 milhões, e que apenas 50% destes são alimentados com produtos industrializados (ZANNI, 2006) sendo o Brasil um grande mercado potencial para os próximos 10 anos. O volume comercializado em 2005 foi de 1.562.400 tons, e estão previstos 1.672.300 para o ano de 2006 (SINDIRAÇÕES, 2006).

A indústria de alimentos para animais de estimação é fortemente baseada na utilização de matérias primas de origem animal que não são utilizadas para o consumo humano (RIVERA; SEBRANEK; RUST, 2000). Estas matérias primas são geralmente categorizadas como subprodutos de carne e uma grande porcentagem desta fonte potencial de proteína é descartada devido apenas à aparência do material.

Os alimentos úmidos à base de carne para animais de estimação são caracterizados por possuírem teores de umidade entre 30% e 84% (BRASIL, 2003a). Estes alimentos são estáveis à temperatura ambiente pois são geralmente tratados termicamente a temperaturas da ordem de 121°C. O produto é esterilizado já em sua embalagem final, que além de resistência térmica e mecânica à alta temperatura, deve apresentar excelentes propriedades de termossoldagem, barreira ao oxigênio, luz e umidade (OLIVEIRA et al., 1990; SARANTÓPOULOS; OLIVEIRA; CANAVESI, 2001). Frente a estas exigências, os produtores de alimentos úmidos para animais de estimação têm no presente outras opções de embalagens além da típica lata de Folha-de-flandres, como por exemplo bandejas de alumínio com camada interna de polipropileno

termosselável, embalagens plásticas rígidas e laminados flexíveis ou *retortable pouches*. (OLIVEIRA, 2005)

Atualmente no Brasil apenas uma empresa produz e comercializa alimentos úmidos para animais de estimação utilizando bolsas flexíveis esterilizáveis. Cada vez mais este tipo de embalagem é utilizada na indústria de alimentos para animais de estimação para agregar valor ao produto final, pois a impressão multicolorida e a possibilidade de variar os formatos são os diferenciais que fazem o produto destacar-se e ser facilmente reconhecido pelo consumidor no ponto de venda (ALCAN..., 2004).

Inicialmente, o uso das embalagens plásticas para alimentos era restrito à sua característica de barreira, protegendo alimentos das ações do ambiente externo. No entanto, o desenvolvimento de materiais tornou possível o surgimento de embalagens flexíveis capazes de suportar altas temperaturas. Quando comparado às latas e aos vidros, as bolsas flexíveis oferecem vantagens devido ao seu estreito perfil e sua natureza flexível (CRISTIANINI, 1998). Lopez (1981) apresenta uma série de vantagens atribuídas ao processamento térmico de alimentos em bolsas flexíveis. Entre as principais vantagens mencionam-se:

- Redução à exposição a altas temperaturas resultando em melhoria de sabor, cor, odor e retenção de nutrientes;
- Maior segurança e facilidade aos consumidores para abertura, utilização e descarte de embalagens, quando comparadas aos vidros e às latas;
- O formato 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.

A indústria de alimentos para animais de pequeno porte busca o desenvolvimento de produtos que possuam alta palatabilidade, com a maior retenção possível de nutrientes e que mantenham a característica de se assemelharem à produtos de consumo humano. O processo de esterilização tem

uma grande influência no desenvolvimento do sabor destes alimentos (principalmente através das reações de Maillard) assim como na geração de sabores desagradáveis. Portanto, o processo de esterilização é considerado um fator chave para a palatabilidade de alimentos úmidos para animais de pequeno porte (RETORT..., 2005).

Os métodos numéricos para resolução das equações diferenciais de transferência de calor auxiliam o desenvolvimento e otimização destes processos de esterilização, pois podem ser aplicados em situações mais realísticas onde as geometrias são complexas, os sistemas são heterogêneos e as condições de contorno são dependentes do tempo. O método de elementos finitos tem sido considerado uma técnica eficiente para resolver equações numéricas, pois esta não é limitada por geometrias e ainda resolve problemas não lineares (NAVEH; KOPELMAN; PFLUG, 1983).

O aprimoramento das técnicas de cálculo e o auxílio de computadores expõem soluções mais precisas para os cálculos de transferência de calor e por isso requerem também dados mais precisos das propriedades térmicas dos alimentos.

Enquanto os 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 misturas ar-vapor como meio de aquecimento não podem assumir as mesmas características (LEBOWITZ; BHOWMIK, 1989). Diversos métodos têm sido utilizados para a determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor para bolsas flexíveis, como métodos numéricos (McGINNIS, 1986), equações baseadas na curva de aquecimento (f_h) (PETERSON; ADAMS, 1983), e métodos de otimização (LEBOWITZ; BHOWMIK, 1989).

Alimentos úmidos para animais de pequeno porte em bolsas flexíveis esterilizáveis têm um grande potencial de mercado no Brasil, e um grande potencial para exportações, pela nossa abundante disponibilidade de subprodutos cárneos. Mesmo sendo um mercado já desenvolvido na Europa e Estados Unidos, não há literatura sobre o desenvolvimento e otimização desta categoria de alimento.

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil, órgão responsável pela regulamentação de alimentos para animais de estimação, até o presente momento não conta com nenhuma lei ou decreto específico para validação de processos de produtos acabados esterilizados.

Diante deste cenário, o objetivo deste trabalho é avaliar o método de simulação de processamento térmico de um alimento para animais de estimação, a base de carne, particulado, não homogêneo, contido em uma bolsa flexível tipo *stand up pouch* e validar o modelo matemático proposto comparando os resultados obtidos através deste com processos sub-letais para esporos de *Clostridium sporogenes*.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Elaborar um modelo matemático, pela técnica de Elementos Finitos, para simular o processamento térmico de alimentos condutivos particulados em uma matriz cárnea destinados a animais de pequeno porte (petfood) em embalagens esterilizáveis flexíveis.

2.2 Objetivos Específicos

1. Determinar os parâmetros D e z de *Clostridium sporogenes* em dois alimentos condutivos.
2. Determinar as propriedades físicas: densidade, condutividade e difusividade térmica dos cubos manufaturados a base de carne e da mistura de carne.
3. Elaborar um modelo matemático para:
 - Descrever o perfil de temperatura em todo o volume, utilizando o método de elementos finitos, durante o processamento térmico de um alimento condutivo embalado em bolsas flexíveis esterilizáveis;
 - Calcular a destruição térmica de microrganismos na distribuição de temperaturas no interior da embalagem;
4. Validar o modelo comparando os valores de esterilização média da massa obtidos por simulações de processos sub-letais com os valores reais experimentais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processamento Térmico

3.1.1 Processamento Térmico de Alimentos

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 processamento 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 com apertização, mereceu o interesse da indústria e com ele a procura por novos métodos e materiais.

A transferência de calor durante o processo de esterilização ocorre de maneira muito lenta em um grande número de alimentos envasados, especialmente quando não existem correntes de convecção no interior da embalagem. Como consequência, para que o ponto frio do alimento atinja o valor de esterilização desejado, o mesmo é aquecido na autoclave de maneira muito mais intensa na periferia do que seria necessário para que a esterilidade comercial fosse atingida, resultando em perdas consideráveis de fatores de qualidade (PINHO, 2003). As alterações organolépticas são tão grandes que freqüentemente o produto processado é totalmente diferente do produto fresco (EVERSON et al., 1964).

Segundo Mulley, Stumbo e Hunting (1975) geralmente a eficiência do processamento térmico é medida utilizando-se critérios microbiológicos, porém existe o risco de ocorrer contaminação durante o processo de esterilização comprometendo a avaliação da intensidade do tratamento térmico aplicado. Desta forma, a simulação de processo através do modelamento matemático parece ser

um adequado método para se avaliar, em conjunto com as medidas microbiológicas, o processamento térmico aplicado.

3.1.2 O uso de Bolsas Flexíveis no Processamento Térmico de Alimentos

Embalagens flexíveis esterilizáveis é uma das categorias de embalagens com maior crescimento global na última década. Algumas vantagens das embalagens flexíveis esterilizáveis são: melhoria do sabor devido aos reduzidos tempos de processo, facilidade e segurança de abertura da embalagem, quando comparado às latas, facilidade em servir, diferenciação do produto e embalagem nas prateleiras de supermercados, melhorias em logísticas (RETORT..., 2004) além de um potencial de redução de energia em processamento. A possibilidade de produzir alimentos de maior qualidade com menor custo (STEFFE et al., 1980) tem levado cientistas a avaliar o processamento térmico de vários produtos alimentícios em bolsas flexíveis. Hoje, já é possível encontrar no mercado uma grande variedade de produtos em embalagens flexíveis esterilizáveis, incluindo peixes, carnes processadas, alimentos prontos, alimentos para animais de estimação, patês, pasta, molhos para carnes, etc. (RETORT..., 2004).

Dois tamanhos básicos de bolsas têm sido utilizados no segmento de alimentos para animais de estimação: para porções individuais para gatos utilizam-se bolsas de aproximadamente 95 x 125 mm, acomodando cerca de 85g de produto, enquanto que as porções individuais para cães, com dimensões aproximadas de 95 x 165 mm, comportam por volta de 150g de produto.

Evans et al. (1978) 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 diferente (cenouras e ervilhas com salmoura, recheio de tortas, carnes com molhos etc.). Avaliou-se: a) o efeito de diferentes métodos de fechamento das embalagens; b) diferentes formas de transferência de calor dentro do produto; c) o efeito de 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.

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. Quando uma diferença de pressão ocorre no início do ciclo de resfriamento a expansão dos gases no interior da bolsa pode provocar explosão da embalagem se não houver um controle rigoroso da sobrepressão de ar no interior da autoclave (CRISTIANINI, 1998).

Freire (1992) avaliou a modificação de uma autoclave vertical Dixie de escala piloto (300L) para permitir o tratamento térmico de bolsas esterilizáveis. As modificações incluíram a instalação de uma linha de injeção de ar na tubulação de entrada de vapor, construção de prateleiras para confinamento das bolsas, instalação de um nível de água e uma tubulação de desaeração. A autoclave modificada apresentou melhor controle de temperatura a 121°C para todos os meios de aquecimento utilizados (vapor, ar-vapor e água). O aumento de ar residual no interior da embalagem estudadas produziu um aumento do f_h , j_h e f_c , e uma diminuição do f_c e da letalidade do processo.

No Brasil, os estudos com bolsas flexíveis termoprocessáveis iniciaram-se em 1976 no Centro de Tecnologia de Embalagens de Alimentos (CETEA) do ITAL (ORTIZ, 1986). 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.

Carvalho Filho (1996) avaliou o processamento térmico de purê de banana em bolsas esterilizáveis de 130 x 170mm, processadas em autoclave por imersão total em água com sobrepressão. Um F_0 de 0,64 min. Foi suficiente para garantir

um produto microbiologicamente estável e visivelmente atraente. Também foi analisada a integridade asséptica das embalagens através de bioteste com esporos de *Bacillus subtilis*. O bioteste mostrou maior sensibilidade na avaliação de defeitos menores que 100 µm de diâmetro quando comparado ao típico teste eletrolítico.

3.2 Modelamento Matemático em Processos de Esterilização de Alimentos

Os processos térmicos são modelados e calculados com o intuito de garantirem a inativação bacteriana capaz de causar risco à saúde pública e assegurarem a probabilidade de deterioração a um mínimo determinado. Assim extremo cuidado é necessário no cálculo de tempo e temperatura a fim 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.

Vários métodos têm sido publicados desde que Ball, em 1923, publicou seu primeiro modelo matemático clássico para avaliar processos de esterilização de alimentos, (HAYAKAWA, 1978).

Os métodos são divididos em dois grupos, o Método Geral e o Método de Formulas. O Método Geral é geralmente mais preciso pois normalmente 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 permite 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).

Os métodos numéricos para resolução de equações diferenciais podem ser utilizados para problemas mais realísticos e complexos de transferência de calor, como aqueles apresentados pela maioria dos processos de esterilização de alimentos. A idéia básica de qualquer método numérico consiste em transformar um domínio contínuo em um problema discreto com número finito de pontos nodais (ANDRADE; ZAPAROLI, 2002).

Atualmente, dois métodos numéricos têm sido utilizados para o tratamento de problemas de condução de calor em alimentos: o Método de Diferenças Finitas (MDF) e o Método de Elementos Finitos (MEF). 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 assumidos como tal. O Método de Elementos Finitos pode ter um melhor desempenho que o MDF para geometria irregulares, condições de contorno complexas e materiais heterogêneos. O MEF envolve a discretização de um domínio em um grande número de pequenos elementos, o desenvolvimento de equações para os elementos, a junção das equações para todo o domínio e a resolução das equações (WANG; SUN, 2002). As equações dos elementos são obtidas pela minimização das 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 diversas, permitindo uma melhor representação do problema. Os polinômios que interpolam a variação da função

incógnita em cada elemento podem ser tanto lineares com de ordens superiores. Isto permite uma maior flexibilidade ao método.

Vários trabalhos têm sido publicados utilizando-se simulações numéricas para o processamento de alimentos condutivos em bolsas flexíveis (McGINNIS, 1986; OHLSSON, 1980; CRISTIANINI, 2002; ABDUL GHANI; FARID, 2005). 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.).

Govaris e Scholefield (1988) desenvolveram um método bidimensional utilizando as equações de transferência de calor para o cálculo do processamento térmico de 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.

A maioria dos modelos matemáticos, apresentados na literatura até o presente momento, assumem formas retangulares ou paralelepípidicas para as bolsas, com algumas exceções. No entanto, durante o processamento térmico em posição horizontal, as bolsas flexíveis assumem uma forma peculiar de travesseiro. As aproximações a formas mais convencionais (bloco, placa plana) para o cálculo de transferência de calor podem levar a um processo térmico superestimados 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 têm demonstrado sua aplicabilidade no processamento de alimentos (CRISTIANINI, 2002; NAVEH et al., 1983; BANGA, et al., 1993).

3.3 Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas de um material são influenciadas pelo teor de água do produto, temperatura, composição, densidade e porosidade (STOLF, 1972). O avanço das técnicas computacionais tem possibilitado o uso de métodos matemáticos mais sofisticados para a resolução das equações diferenciais de transferência de calor. Assim sendo, as propriedades térmicas, condutividade, calor específico e difusividade térmica devem ser determinadas com extremo cuidado, já que disto dependerá a exatidão dos modelos matemáticos de temperatura obtidos.

3.3.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica é a propriedade física de um dado material que descreve a habilidade desse de conduzir calor.

Métodos empíricos de determinação da condutividade têm sido empregados e um grande número de dados para produtos alimentícios foi determinado por meio de equações. Estas expressões apresentam sérios inconvenientes, já que existem variações na composição química, estrutura interna e outros fatores que podem afetar as propriedades térmicas dos produtos e que não são computados. As equações são baseadas apenas na matéria seca e teor de umidade do material (PARK; MURR; SALVADEGO, 1997).

Existem diversas técnicas para determinação da condutividade térmica de alimentos. Reidy e Rippen (1971) apresentam diversos métodos, estacionários e transientes, para determinação de condutividade térmica, suas vantagens e desvantagens.

Um método transiente bastante utilizado é o da sonda linear. Esta metodologia consiste em aplicar na amostra uma quantidade de calor conhecida através de uma sonda e medir a variação de temperatura em intervalos de tempo conhecidos.

Unklesbay et al. (1992) utilizou o método da sonda linear para determinar condutividade térmica de uma mistura extrusada de carne e farinha de milho. Os autores verificaram que não houve diferenças significativas entre os produtos extrusado em diferentes condições de temperatura. Apenas houve diferenças significativas entre produtos com diferentes formulações.

Tsai et al. (1998) utilizaram a metodologia da sonda linear para determinar a condutividade térmica de produtos de carne reestruturados. Os autores verificaram que a condutividade varia de acordo com o conteúdo de umidade e proteína dos diferentes produtos testados

Cristianini (1998) apresenta uma comparação entre o método da sonda linear e uma metodologia que utiliza Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) para a determinação da condutividade térmica de atum em salmoura. O autor verificou que o método da sonda linear foi o método mais preciso.

3.3.2 Calor Específico

Calor específico indica a energia requerida para mudar a temperatura de uma unidade de massa de um determinado material (MURPHY; MARKS; MARCY, 1998).

Assim como a condutividade térmica, o calor específico de um alimento depende de fatores como composição, umidade, temperatura e pressão do mesmo. Singh e Heldman (1993) apresentam fórmulas para o cálculo do calor específico de alimentos baseadas em sua composição centesimal.

Segundo Murphy, Marks e Marcy (1998), os métodos mais utilizados para a determinação de calor específico são o método das misturas e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC).

Unklesbay et al. (1992) determinaram o calor específico de uma mistura de carne e farinha de milho pelo método das misturas. A falta de diferença

significativa entre os vários produtos neste estudo foi verificada devido à pequena variação de umidade do produto (43.3% a 44.9%).

Tocci e Mascheroni (1998) utilizaram a técnica de Calorimetria Diferencial de Varredura para determinar o calor específico de carne bovina e suína. Os autores verificaram que os resultados experimentais podem ser previstos utilizando uma equação que apenas relaciona temperatura e umidade da amostra.

Ngadi e Ikediala (1997) utilizaram DSC para determinar o calor específico de músculos de frango. Os autores verificaram que o calor específico do material demonstrou uma variação quadrática com o conteúdo de umidade

Outros autores têm utilizado a Calorimetria Diferencial de Varredura para determinação de calor específico de produtos alimentícios. Entre eles podem ser citados os trabalhos de Stapley, Gladden e Fryer (1997), Chang e Toledo (1990) e Cristianini (1998).

3.3.3 Difusividade Térmica

A difusividade térmica é a razão entre a condutividade térmica, o calor específico e a densidade e mede a habilidade do material em transmitir um distúrbio térmico (FONTANA et al., 2001).

Uma metodologia bastante utilizada para a determinação da difusividade térmica de alimentos é a da célula de Dickerson (DICKERSON, 1965). Esta metodologia simples, apesar de ser bastante antiga, continua sendo empregada por diversos autores. Moura, Vitali e França (2001) utilizaram a célula de Dickerson para determinar difusividade térmica de soluções modelo similares a creme de leite.

Oliveira et. al (2005) utilizaram a metodologia para determinar a difusividade de presunto cozido. Os valores encontrados foram diferentes dos valores prévios encontrados na literatura. Segundo os autores, as diferenças devem-se

provavelmente aos espaços vazios presentes na amostra nos trabalhos prévios e às diferenças em formulação e nas faixas de temperatura testadas.

Sandberg et al. (1994) utilizou a célula de Dickerson para determinar a difusividade térmica de uma emulsão de presunto e de bentonita. As transições de fase do produto tiveram uma influência significativa na faixa de temperatura medida, portanto, os autores denominam os valores encontrados como “difusividade aparente”. Entretanto, segundo os autores, como a faixa de temperatura estudada foi a mesma utilizada nos ensaios em autoclave, os valores medidos foram apropriados para o estudo em questão.

3.4 Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor

O coeficiente convectivo de transferência de calor (h) indica a quantidade de fluxo de calor que é trocado através de uma unidade de área de um meio ou sistema, em uma unidade de tempo com uma unidade de diferença de temperatura entre os contornos do sistema (COEFFICIENT..., 2006).

O coeficiente de transferência de calor é um parâmetro bastante específico para cada sistema de aquecimento (JACZYNSKI; PARK, 2002) pois depende da geometria do sistema, das propriedades do fluido, da velocidade de escoamento, das condições da camada limite e diferença de temperatura entre o meio de aquecimento e a amostra. Apesar de haver uma ampla faixa de valores recomendados na literatura, esses fatores certamente contribuirão para erros no modelo de temperatura gerado caso o h não tenha sido determinado no próprio sistema (GEANKOPLIS, 1993).

Pelo fato do processamento térmico de embalagens flexíveis ser realizado em processos de mistura Ar-Vapor, o valor de h não deve ser assumido como sendo infinito, como ocorre no caso do processamento de latas metálicas aquecidas diretamente em vapor.

Lebowitz e Bhowmik (1989) e Cristianini (1998) determinaram o coeficiente convectivo de transferência de calor durante o processamento térmico de bolsas flexíveis através de um método de otimização.

Pinho (2003) determinou o valor de h para embalagens de vidro experimentalmente. Utilizou-se a técnica de elementos finitos para a resolução das equações diferenciais de transferência de calor. O perfil real de temperatura da autoclave e a temperatura inicial da amostra foram utilizados como condições de contorno. O coeficiente de transferência de calor (h) foi determinado a partir de perfis de temperatura obtidos experimentalmente de modo que a diferença entre os valores de temperaturas experimentais e aqueles previstos pelo modelo em determinado ponto no interior do alimento fosse minimizada através da otimização do valor de Qui-quadrado.

3.5 O Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos teve suas origens na análise estrutural. Com o surgimento dos primeiros computadores digitais na década de 50 os métodos matriciais para análise estrutural tiveram um grande desenvolvimento. Na década de 70, com a evolução da capacidade e redução dos custos de computadores, as aplicações do método se expandiram para problemas de mecânica de fluidos e de transferência de calor. 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).

Resumidamente, o princípio matemático do método aplicado à resolução de problemas de transferência de calor pode ser descrito conforme a seguir.

A primeira lei da termodinâmica estabelece que a energia térmica é conservada. Especificando isto para um volume de controle diferencial, temos:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = \ddot{q} \quad (3.1)$$

onde:

ρ = densidade

c_p = calor específico

T = Temperatura ($T(x,y,z,t)$)

t = tempo

$$\{L\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} = \text{vetor operador}$$

$$\{v\} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} = \text{vetor velocidade}$$

$\{q\}$ = vetor de fluxo de calor

\ddot{q} = taxa de geração de calor por unidade de volume

Sendo que $\{L\}T$ e $\{L\}^T\{q\}$ podem também ser interpretadas como ∇T e $\nabla \cdot \{q\}$, respectivamente, onde ∇ representa o operador de gradiente e $\nabla \cdot$ representa o operador do divergente.

A Lei de Fourier é usada para relacionar o vetor de fluxo de calor a gradientes de temperatura:

$$\{q\} = -[D]\{L\}T \quad (3.2)$$

onde:

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} = \text{matriz de condutividades}$$

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} = condutividade do elemento nas direções x, y e z.

Combinando-se as Equações 3.1 e 3.2, obtém-se:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\}T \right) = \{L\}^T ([D]\{L\}T) + \ddot{q} \quad (3.3)$$

Expandindo-se a Equação 3.3 para a sua forma mais familiar, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \ddot{q} = \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.4)$$

Três tipos de condições de contorno são consideradas:

1) Temperatura específica na superfície S_1 :

$$T = T^* \quad (3.5)$$

Onde T^* é a temperatura especificada

2) fluxo de calor específico na superfície S_2 :

$$\{q\}^T \{\eta\} = -q^* \quad (3.6)$$

onde:

$\{\eta\}$ = vetor normal

q^* = fluxo de calor especificado

3) fluxo de calor convectivo específico na superfície S_3 :

$$\{q\}^T \{\eta\} = h_f(T_s - T_B) \quad (3.7)$$

onde:

h_f = coeficiente convectivo

T_s = temperatura na superfície

T_B = temperatura do meio

Combinando-se as Equações 3.2, 3.6 e 3.7:

$$\{\eta\}^T [D]\{L\}T = q^* \quad (3.8)$$

$$\{\eta\}^T [D]\{L\}T = h_f(T_B - T) \quad (3.9)$$

Multiplicando-se as Equações 3.3 e 3.4 por uma mudança virtual na Temperatura, integrando-se através do volume do elemento e combinando-se as Equações 3.8 e 3.9 com algumas manipulações, obtém-se:

$$\int_{\text{vol}} \left(\rho c_p \delta T \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T (\delta T) ([D] \{L\} T) \right) d(\text{vol}) = \quad (3.10)$$

$$\int_{S_2} \delta T q^* d(S_2) + \int_{S_3} \delta T h_f (T_B - T) d(S_3) + \int_{\text{vol}} \delta T \ddot{q} d(\text{vol})$$

onde:

$$\{L\}^T = \left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right]$$

q^* = fluxo de calor

h_f = coeficiente convectivo

T_B = temperatura do meio

\ddot{q} = calor gerado por unidade de volume

S_2 = superfície com aplicação de fluxo de calor

S_3 = superfície com aplicação de convecção

Quando uma das seguintes matrizes: calor específico, condutividade ou fluxo de calor são dependentes da temperatura tem-se um problema não linear e a equação que governa o fenômeno pode ser escrita da seguinte forma:

$$[C(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} = \{Q(T)\} \quad (3.11)$$

Como na situação aqui analisada a condição de contorno 3 não existe, a Equação 3.11 acima passa a ser escrita como:

$$[C] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} + [K] \{T\} - \{P\} = 0 \quad (3.12)$$

onde [C] e [K] são as matrizes quadradas dos coeficientes (calor específico e condutividade térmica), {P} é um vetor coluna dos valores conhecidos de temperatura e {T} é um vetor coluna das temperaturas desconhecidas. Sendo que a Equação 3.12 representa a forma matricial das equações dos elementos, ou seja, as equações diferenciais a partir das quais as temperaturas nos elementos podem ser calculadas.

Maiores detalhes a respeito das transformações matemáticas descritas bem como sobre o mecanismo de resolução das equações podem ser encontradas no *Manual Ansys Theory Reference*.

Wang e Sun (2002) citam como principais vantagens do Método de Elementos Finitos a possibilidade de ser aplicado em geometrias irregulares, condições de contorno variadas e materiais não homogêneos e anisotrópicos.

Como desvantagem, Puri e 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 e memórias durante a execução em computadores.

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

3.5.1 A Aplicação do Método de Elementos Finitos no Processamento Térmico de Alimentos

O método dos elementos finitos tem despertado o interesse dos cientistas nos últimos anos. Os fenômenos de transferência de calor em alimentos, apesar de amplamente estudados desde a década de 20, tem sido uma tarefa árdua devido à natureza complexa dos alimentos, que apresentam formas irregulares e frequentemente propriedades anisotrópicas e não uniformes. Além disso, a grande concorrência do mercado e a necessidade de diferenciação dos produtos para captar a atenção dos consumidores têm levado as indústrias a inovarem e disponibilizarem novos e complexos formatos de embalagens para alimentos.

A análise do processamento térmico destas novas embalagens não suporta mais as simples aproximações de esferas, placas e cilindros finitos. Assim, o Método de Elementos Finitos tem se tornado uma ferramenta analítica muito importante, uma vez que, muitas das simplificações e considerações normalmente adotadas com relação às propriedades físicas e formatos dos alimentos podem ser eliminados com o seu uso.

Naveh, Kopelman e Pflug (1983) desenvolveram um método utilizando o método dos elementos finitos para calcular os fatores de conversão para processos térmicos aplicados a potes de vidro cheios com produtos condutivos. Também foi analisado o resfriamento de latas por convecção natural.

Pinho (2003) elaborou um modelo matemático do processo de transferência de calor durante a esterilização de um alimento condutivo infantil embalado em recipiente de vidro. O modelo tridimensional construído utilizou a técnica de elementos finitos e considerou as propriedades térmicas do alimento, do vidro, do *head space* e da tampa metálica separadamente. A comparação da exatidão dos modelos de temperaturas gerados considerando-se os valores do coeficiente convectivo de transferência de calor obtidos a partir da divisão do processamento térmico em duas fases (aquecimento e resfriamento) e em quatro fases (*come up*, aquecimento, início de resfriamento e final de resfriamento), demonstrou que

aquele gerado a partir da divisão em quatro fases apresentou resultados mais exatos. Os resultados dos testes de validação do modelo de destruição microbiológica demonstraram que este foi capaz de prever de maneira satisfatória a destruição de microrganismos, sendo que nos ensaios a 110°C as diferenças entre valores previstos pelo modelo e valores médios obtidos experimentalmente foram sempre inferiores a 12% e naqueles realizados a 115°C esta diferença foi sempre inferior a 27%.

Nicolai et al. (1995) elaboraram um modelo matemático utilizando a técnica de elementos finitos capaz de estimar a distribuição de temperatura durante o processamento térmico de lasanha. Os resultados obtidos a partir de simulações com uma malha bidimensional e com uma malha de apenas uma dimensão não diferiram significativamente, bem como aqueles obtidos considerando-se propriedades térmicas lineares ou não lineares. As temperaturas previstas em vários pontos da amostra apresentaram boa concordância com aquelas obtidas experimentalmente. Foi mostrado que a dependência da temperatura das propriedades termofísicas tem pouca influência na temperatura na região próxima ao centro da lasanha.

Wang e Sun (2002) construíram um modelo matemático tridimensional transiente utilizando o método de elementos finitos para analisar o resfriamento forçado de cubos de carne assada. As variações das propriedades físicas do material e as condições operacionais foram consideradas no modelo. O modelo foi validado experimentalmente. Foi demonstrado que o resfriamento forçado de cubos formados por grandes pedaços de carne assada (4,35kg) de 48°C para 3°C, dentro do tempo requerido de 1,5h, não foi possível. Foi proposta a redução do tamanho dos cubos de carne ou a utilização de outra tecnologia de resfriamento rápido, como resfriamento a vácuo, por exemplo.

Cristianini (1998) estudou a distribuição de temperaturas durante o processo de esterilização de atum em bolsa flexível. Quatro modelos matemáticos de transferência de calor foram testados (soluções analíticas, fórmulas empíricas e

elementos finitos bidimensional e tridimensional) para avaliar o perfil de temperaturas no centro das bolsas, sendo que o método de elementos finitos tridimensional foi o que estatisticamente melhor representou os dados obtidos experimentalmente, tanto no aquecimento como no resfriamento. Desta forma, 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 de vários tipos, formas e tamanhos de embalagens.

Chang, Carpenter e Toledo (1998) usaram o método dos elementos finitos para resolver as equações de transferência de calor no estado transiente para o aquecimento de peru em um forno elétrico convencional. Foi analisado o aquecimento do peito, coxa e sobre-asa.

Ikediala et al. (1996) analisou o processo de fritura de tortas de carne moída pelo método dos elementos finitos. O modelo foi validado comparando-se as temperaturas preditas e experimentais em três posições axiais durante a fritura em panela (um lado apenas e dois lados) a 140 e 180°C. A perda de umidade, tempo de cozimento e formação de crosta são função da temperatura da panela e da frequência e tempo de exposição do produto na chapa quente.

Scheerlinck et al. (2001) desenvolveram um método de elementos finitos aperfeiçoado, com a aplicação da entalpia e das transformadas de Kirchhoff, para a resolução de problemas em transferência de calor não lineares tais como congelamento e descongelamentos de alimentos com geometrias arbitrárias em 3D. Para validar o método, o congelamento de um cilindro cheio de tilose foi investigado e uma boa concordância foi obtida entre os valores reais medidos e os preditos pelo modelo.

3.6 Utilização de Esporos Bacterianos no Monitoramento do Processamento Térmico de Alimentos

Na área de processamento de alimentos deve-se conhecer o alvo do processamento térmico para que possa então ser desenhado o tratamento térmico a ser empregado. Para alimentos de baixa acidez ($\text{pH} > 4,5$ e $a_w > 0,85$) *Clostridium botulinum* é o organismo esporulado, patogênico, termo-resistente que representa maior risco; sendo assim, sua destruição é o requerimento mínimo da esterilização através de tratamento térmico. A recomendação para preservação contra microrganismos esporulados termófilos para produtos estocados a temperaturas acima de 30°C é que seja aplicado um PUNE (Probabilidade de Unidades Não Estéreis) da ordem de 10^{-6} , ou seja, uma unidade não estéril por milhão de unidades produzidas (CAMARGO, 1995).

Para descrever matematicamente o processo de destruição das células bacterianas são necessários que sejam obtidos alguns parâmetros. O valor D (tempo de redução decimal) é o tempo necessário para que a população bacteriana seja reduzida a 10 % da população inicial, ou seja, é o tempo para que ocorra a redução de um ciclo logarítmico na população bacteriana. O valor z (coeficiente térmico) é o número de graus requeridos para que o valor D atravesse um ciclo logarítmico, isto é, para diminuir o valor D a 10% do seu valor (STUMBO, 1973).

O valor F_p é o valor de esterilização requerido (em min) e corresponde à integral da letalidade ao longo do tempo. Este equivale ao tempo total de processo, a uma temperatura fixa, para que se atinja a destruição de microrganismos desejada.

Stumbo (1973) cita vários métodos que podem ser utilizados para a determinação dos parâmetros D e z, são eles: o tubo TDT, a lata TDT, o termorresistômetro, o frasco de 3 bocas e o tubo capilar. Cada método é mais adequado para um determinado tipo de microrganismo. No caso de alimento

úmido para animais de estimação, um produto com alta viscosidade, a metodologia mais indicada é a dos tubos TDT.

O uso de microrganismos indicadores para validar biologicamente processos térmicos de esterilização apresenta-se como uma forma bastante útil de assegurar a aplicação dos processos desenhados. Para tanto, devem ser selecionados microrganismos que possam atender às condições a serem validadas. A seleção dos microrganismos indicadores também é feita com base em seu valor D (tempo de redução decimal), de modo que a partir de uma população inicial conhecida e considerando-se o valor de esterilização desenhado no processo, a população final de microrganismos seja de nível mensurável, ou seja, o processo térmico de validação microbiológica deve ser subletal (CAMARGO, 1995). O *Clostridium sporogenes* pode ser escolhido como um organismo de teste devido aos parâmetros cinéticos de sua inativação térmica serem bem conhecidos e devido à importância do gênero *Clostridium* para a indústria de alimentos (WELT et al., 1994).

Segundo Pflug (1990), as características que justificam o uso de esporos como indicadores de esterilização são devida à sua:

- Estabilidade; que é superior a das células vegetativas, já que as propriedades dos organismos indicadores devem se manter constantes durante a propagação de subcultura para subcultura e durante a estocagem;
- habilidade em responder às pequenas variações no ambiente: os esporos respondem quantitativamente às variações físicas, e são sensíveis a um grande número de condições ambientais além da temperatura, como por exemplo: presença de substâncias químicas no ambiente, pH do substrato, disponibilidade de água, dentre outros fatores. Quando se deseja medir o efeito de determinado fator que afeta a sobrevivência dos esporos, os demais devem ser mantidos constantes;

- facilidade de manuseio e produção de culturas;
- resistência: o alto nível de resistência à destruição por agentes físicos e químicos apresentada pelos esporos está diretamente relacionado com as características estruturais e químicas da sua capa e da camada protetora.

A resistência dos esporos utilizados como indicadores biológicos aos agentes esterilizantes deve, obrigatoriamente, ser maior do que a resistência dos organismos contaminantes do item a ser esterilizado, quer sejam estas células vegetativas ou esporos, ou seja, os organismos indicadores devem reagir de forma mais lenta ao agente letal que a carga contaminante (CAMARGO, 1995). Na indústria, a fim de evitar a contaminação por *Clostridium botulinum*, recomenda-se que esporos de *Clostridium sporogenes* sejam utilizados como organismo teste, já que este não é tóxico, é mais termorresistente e tem as mesmas necessidades fisiológicas do *C. botulinum* (GOLDONI et al., 2001).

Brown et al. (1984) utilizaram o *Clostridium sporogenes* PA 3679 e *Bacillus stearothermophilus* para validar as simulações de processamento térmico de cubos formados por uma mistura de carne, batata e alginato. As predições teóricas da eficiência do processamento térmico foram comparadas com os dados experimentais obtidos pela contagem dos microrganismos sobreviventes, indicando que o método proposto pode ser utilizado para a simulação do processo térmico de alimentos particulados.

Segner et al. (1989) delinearam um procedimento biológico para avaliar a simulação de transferência de calor para a esterilização de alimentos particulados em um trocador de calor de superfície raspada. O modelo utilizado, baseado na simulação de Ruyter e Brunet, foi capaz de calcular os valores teóricos de F_0 do produto para cada seção do trocador. Cubos de carne de peru foram inoculados com *Clostridium sporogenes* pelo método da corda inoculada, introduzidos no sistema com uma solução viscosa de amido, embalados assepticamente, incubados e os sobreviventes foram quantificados, suportando a validação do modelo de simulação utilizado.

Sandberg et al. (1994) utilizaram o *Clostridium sporogenes* para validação de um modelo de transferência de calor bi-dimensional em presunto, processados com temperaturas iniciais abaixo do ponto de congelamento. O modelo foi construído utilizando-se o método das diferenças finitas e valores de difusividade dependentes da temperatura. Segundo os autores, os valores de D e z do microrganismo não foram afetados pelo congelamento prévio das amostras.

Bellara et al. (1999) elaboraram um modelo matemático de transferência de calor utilizando a técnica de diferenças finitas. Após a validação do modelo de temperatura, foi feita a validação microbiológica do modelo através da imobilização de *Salmonella typhimurium* e *Brochothrix thermosphacta* em blocos cilíndricos de ágar. Os blocos cilíndricos foram submetidos a aquecimento por condução através da imersão dos mesmos em um banho com água. Verificou-se que os resultados obtidos experimentalmente e aqueles apontados pelo modelo apresentaram diferenças inferiores a 4,0%, o que foi considerado bastante satisfatório pelos autores, demonstrando a utilidade da técnica.

Santos Filho e Penna (2003) utilizaram o *Bacillus stearothermophilus* ATCC 7953 para a validação do processo térmico de um produto vegetal enlatado. Em todas as operações de esterilização do estudo, a presença de esporos sobreviventes no indicador biológico não foi detectada, suportando a validação do processo e da autoclave utilizada.

3.6.1 O *Clostridium sporogenes*

O *C. sporogenes* é um típico organismo formador de esporo, termorresistente, mesofílico, muito utilizado para o estabelecimento de especificações de processamento térmico (KOUTCHMA et al., 2005).

Trata-se de um bacilo Gram positivo que apresenta motilidade, altamente distribuído na natureza e intestino de animais. Seus esporos são ovais, centrais ou

terminais. O *C. sporogenes* não é patogênico, e suas propriedades fisiológicas são muito similares a do *C. botulinum*.

Os esporos do *C. sporogenes* são extremamente termorresistentes. A resistência é afetada tanto pelas condições de crescimento da bactéria como pelo meio em que os esporos são aquecidos. Como os esporos de *C. sporogenes* são muito utilizados no monitoramento de processos de esterilização, é de extrema importância o bom conhecimento da resistência térmica destes. Pode-se verificar na literatura que os valores de $D_{121^{\circ}\text{C}}$ do referido microrganismo encontrados por diversos autores são bastante variáveis, obtendo-se valores de 1,0 min até 3,1 min dependendo da variedade e do alimento onde o valor foi determinado.

Stumbo, Murphy e Cochran (1950) analisaram a natureza das curvas de morte térmica dos esporos de *C. sporogenes* PA 3679 suspensos em uma variedade de produtos alimentícios e sujeitos a temperaturas entre 104 e 132°C. Os autores concluíram em seu trabalho que todas as curvas encontradas em seus estudos foram essencialmente linhas retas.

O pH do meio de aquecimento tem forte influência na resistência térmica do microrganismo. Rodrigo e Martinez (1988) determinaram a resistência térmica de *C. sporogenes* PA 3679 em tampão fosfato e em purê de alcachofra. Os autores confirmaram em seus estudos que a termorresistência foi afetada pela diferença de pH 7,0, do tampão fosfato e do pH 5,2 do purê de alcachofra, sendo que os valores de z para o último foram significativamente menores.

Cameron, Leonard e Barrett (1980) compararam a resistência térmica do *C. sporogenes* PA 3679 em purê de ervilha e tampão fosfato. Os autores concluíram que um aumento na acidez do meio foi acompanhado do decréscimo na resistência térmica do microrganismo e que apesar dos valores de z encontrados serem maiores para o tampão fosfato, quando comparados aos valores encontrados para o purê de ervilha, os valores de D para o último foram maiores. Ainda, encontraram uma surpreendente queda do valor de D , quando testada a

resistência em pH 6,2, tanto para fosfato quanto para o purê de ervilha utilizado com meio.

Ocio et al. (1994) analisaram a influência do extrato de cogumelo, acidificação e tipo de acidulante na resistência térmica de *C. sporogenes* PA 3679. Os resultados apresentados indicaram que tanto o pH como a natureza do substrato afetam significativamente a resistência térmica do microrganismo, suportando a idéia de que os dados experimentais da resistência térmica de um produto, em uma determinada condição de processamento, não pode ser necessariamente aplicada a outro tipo de produto ou outra condição de processamento.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Fluxograma do trabalho realizado

A figura 1 apresenta o fluxograma do trabalho realizado. A determinação das propriedades térmicas para a elaboração do modelo matemático foi realizada em paralelo à produção da solução de esporos e determinação dos parâmetros de morte térmica do *Clostridium sporogenes*. Essas duas linhas de trabalho são a base para a validação final do modelo de destruição microbiológica proposto.

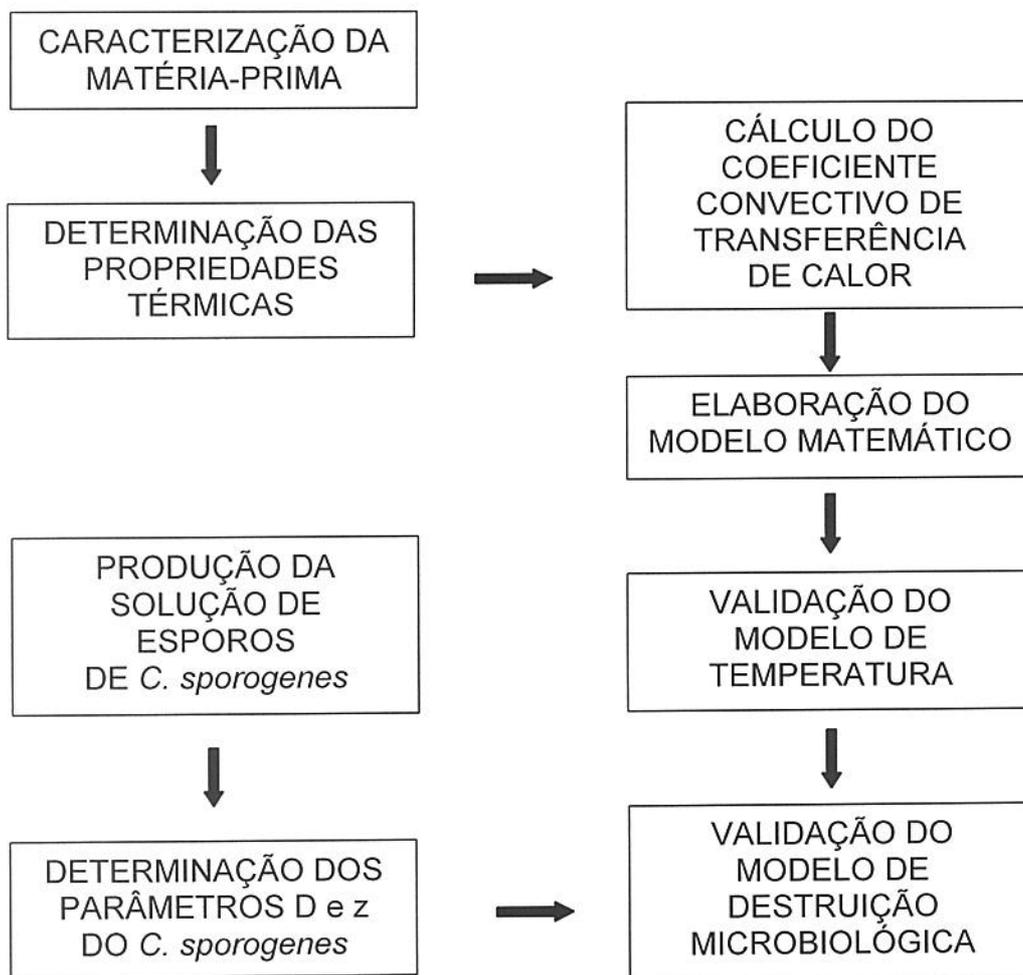


Figura 1 – Fluxograma do trabalho realizado

4.2 Caracterização da Amostra

O produto utilizado na realização de todos os experimentos da tese foi um alimento úmido para animais de pequeno porte composto de 20% em peso de cubos manufaturados a base de carne, com dimensões de 2,0cm x 2,0cm x 2,0cm, dispersos em uma mistura de carnes que formam uma matriz cárnea, provenientes de um único lote fornecido pela Masterfoods Brasil Alimentos LTDA (Mogi Mirim). Tanto os cubos manufaturados de carne quanto a matriz cárnea são formulados a partir de miúdos de bovinos, miúdos de aves, miúdos de suínos, farinha de trigo, carragena, corante, cloreto de potássio, cloreto de sódio e água. A formulação exata dos produtos não foi indicada pelo fornecedor.

O processamento industrial dos cubos manufaturados a base de carne consiste na moagem das carnes a 5,0mm, mistura de todos os ingredientes em um misturador de inox de pás duplas e emulsificação. A emulsão formada foi retirada do processo e congelada a -20°C na Planta Piloto da Masterfoods. Para a manufatura dos cubos a base de carne neste experimento, a emulsão foi descongelada a 4°C, um dia antes, e cozida dentro de um saco plástico impermeável em um recipiente com água fervente por 20 minutos. Após o cozimento, a massa coagulada foi cortada manualmente em cubos de 2,0mm x 2,0mm x 2,0mm e adicionada à matriz cárnea na proporção de 20% de cubos de carne e 80% de matriz cárnea.

O processamento industrial da matriz cárnea consiste na moagem das carnes a 5,0mm e mistura de todos os ingredientes em um misturador de inox de pás duplas. A matriz cárnea foi retirada do processo e congelada a -20°C na Planta Piloto da Masterfoods e descongelada a 4°C, um dia antes da realização de cada experimento.

As embalagens utilizadas são bolsas flexíveis com dimensões de 120 x 178 mm e capacidade para aproximadamente 350g de produto, fornecidas pela Alusa S.A. – Chile. Os materiais de fabricação são: Poliéster, Alumínio, Poliamida

orientada e Polipropileno, somando uma espessura total de 100 μ m. A espessura exata de cada componente não foi especificada pelo fornecedor.

4.2.1 Análises de Composição Centesimal do Produto

As amostras foram caracterizadas através das seguintes análises de composição centesimal:

- Nitrogênio total / Proteínas (AOAC, 1990);
- Lipídeos Totais (AOAC, 1990);
- Cinzas (AOAC, 1990);
- Umidade (Normas Analíticas Instituto Adolfo Lutz, 1995);
- Carboidratos, calculado pela diferença (CHANG; CARPENTER, 1997).

As análises foram realizadas em triplicata.

4.2.2 Determinação da Carga Microbiana Inicial

Foram realizadas contagens de mesófilos aeróbios (BRASIL, 2003b), contagem de mesófilos anaeróbios, contagem de termófilos aeróbios e contagem de termófilos anaeróbios (BRASIL, 1991/1992).

4.2.3 Determinação das Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas foram determinadas utilizando-se a amostra previamente descongelada. A faixa de temperatura utilizada foi definida em função das limitações das metodologias empregadas na determinação de cada uma das propriedades térmicas.

4.2.3.1 Condutividade Térmica (k)

A condutividade térmica foi determinada utilizando-se o método transiente da sonda linear (SWEAT; HAUGH, 1974).

O método consiste em inserir na amostra uma sonda que contém em seu interior um termopar e um fio de constantan. Este fio, ao ser percorrido por uma corrente elétrica, produz calor a uma razão constante e a temperatura em um determinado ponto do material é medida pelo termopar.

Conhecendo-se a temperatura (T), o tempo (t) e a potência da fonte (Q), a condutividade térmica pode ser determinada através da Equação 4.1:

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4 \pi k} \ln(t / t_1) \quad (4.1)$$

Esta teoria baseia-se na relação entre a condutividade térmica e a elevação da temperatura em um meio infinito homogêneo devido à fonte linear de aquecimento de potência constante (PARK; MURR; SALVADEGO, 1998).

Utilizou-se o equipamento KD2 (Decagon, Instrumentation for Soil Physics, Pullman, WA), cujo comprimento da agulha é de 6 cm e o diâmetro 0,9 mm. Quando o processo de medição é iniciado, o aparelho aguarda cerca de 90 segundos para que a temperatura da amostra se estabilize. A sonda é percorrida por uma corrente elétrica de aproximadamente 40 mA enquanto a temperatura é lida a cada segundo por um período de 30 segundos. Ao final das leituras a condutividade é calculada a partir dos dados tempo x Temperatura adquiridos. O resultado é fornecido em 2 minutos. A faixa de temperatura empregada nas determinações foi de 10 a 80°C. O produto foi aquecido em banho Micronal modelo B13-D e as medidas foram realizadas somente quando as temperaturas do banho e do produto eram constantes.

A Figura 2 apresenta uma representação esquemática da sonda utilizada e na Figura 3 pode ser verificado o sistema de medição empregado. A amostra foi colocada em um recipiente plástico de 200 mL. Tomou-se o cuidado de não

comprimir a amostra bem como de não permitir a presença de ar, fatores que poderiam interferir nos resultados obtidos.

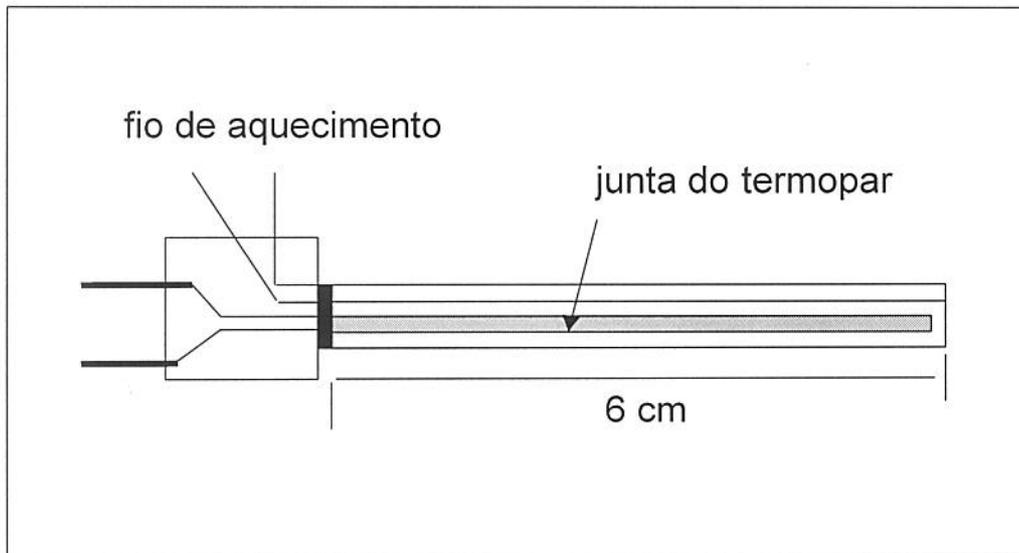


Figura 2 – Sonda Linear utilizada na medida da condutividade

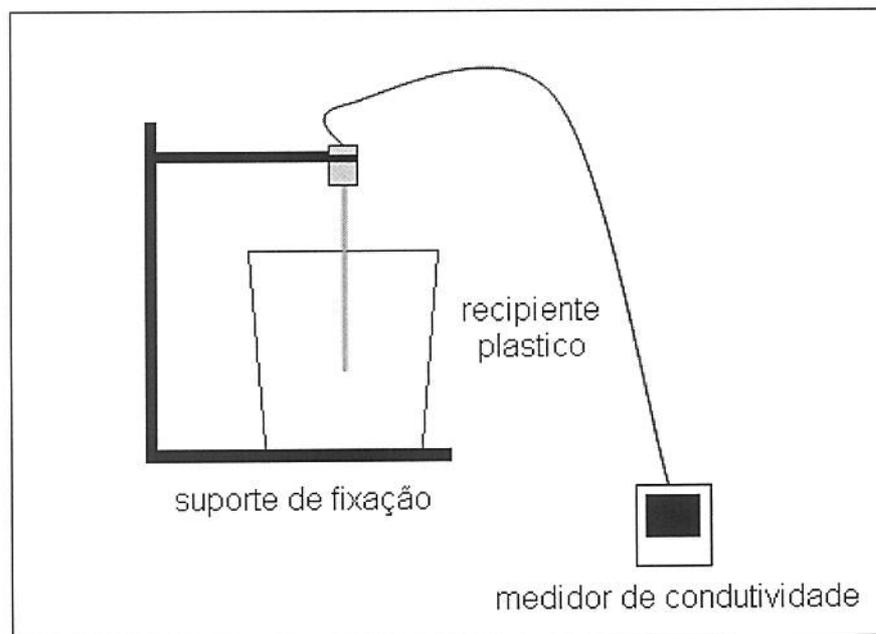


Figura 3 – Sistema empregado na determinação de condutividade térmica

4.2.3.2 Densidade (ρ)

A densidade foi determinada através de picnometria. Um volume conhecido da amostra foi pesado em um recipiente de vidro cilíndrico de cerca de 10,0 mL de volume. O volume exato do recipiente foi previamente determinado, calibrando-se com água. A amostra era colocada no interior do recipiente tomando-se o cuidado de não comprimi-la e nem permitir a presença de ar no interior da mesma.

4.2.3.3 Difusividade Térmica (α)

A difusividade térmica das amostras de cubos de carne manufacturados, da matriz cárnea e da suspensão de bentonita empregada na determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor foi determinada utilizando-se a célula de Dickerson (DICKERSON, 1965) do Laboratório de Medidas Físicas da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP.

A célula é constituída por um tubo de liga metálica de 5,0 cm de diâmetro e 29,5 cm de altura, com dois termopares acoplados, um no centro geométrico e outro na parede da célula, também na altura do centro. Esta célula foi preenchida com a amostra, tomando-se o cuidado de não comprimi-la e nem permitir que existam espaços vazios contendo ar no interior da mesma, o que poderia interferir nos resultados obtidos. A célula foi fechada com dois tampões de teflon e colocada em um banho Micronal modelo B13-D com água a temperatura ambiente. Após ocorrer o equilíbrio entre a temperatura da amostra e a do banho, era iniciado o aquecimento a uma taxa de aproximadamente 0,7°C/min. O banho possuía um agitador de modo a garantir a uniformidade da temperatura do mesmo e o aquecimento foi realizado até que a temperatura do banho atingisse aproximadamente 90°C. O aparato empregado na determinação da difusividade encontra-se na Figura 4.

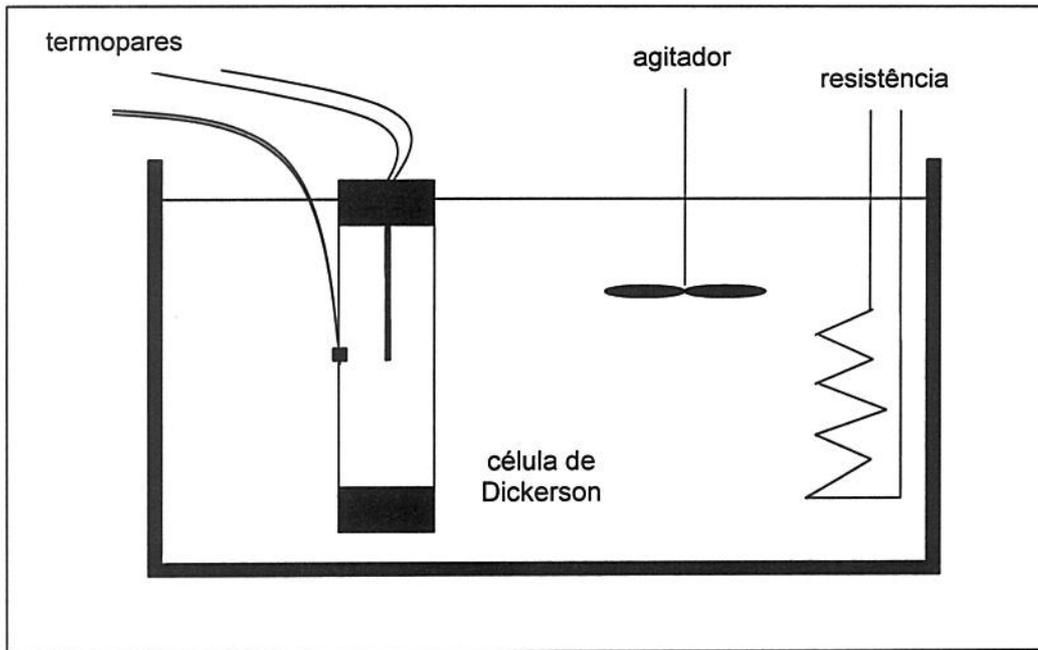


Figura 4 – Aparato utilizado na determinação da difusividade

A difusividade térmica foi calculada considerando-se a porção do gráfico em que as temperaturas interna e da parede são retas paralelas, como pode ser verificado na figura 5.

DIFUSIVIDADE

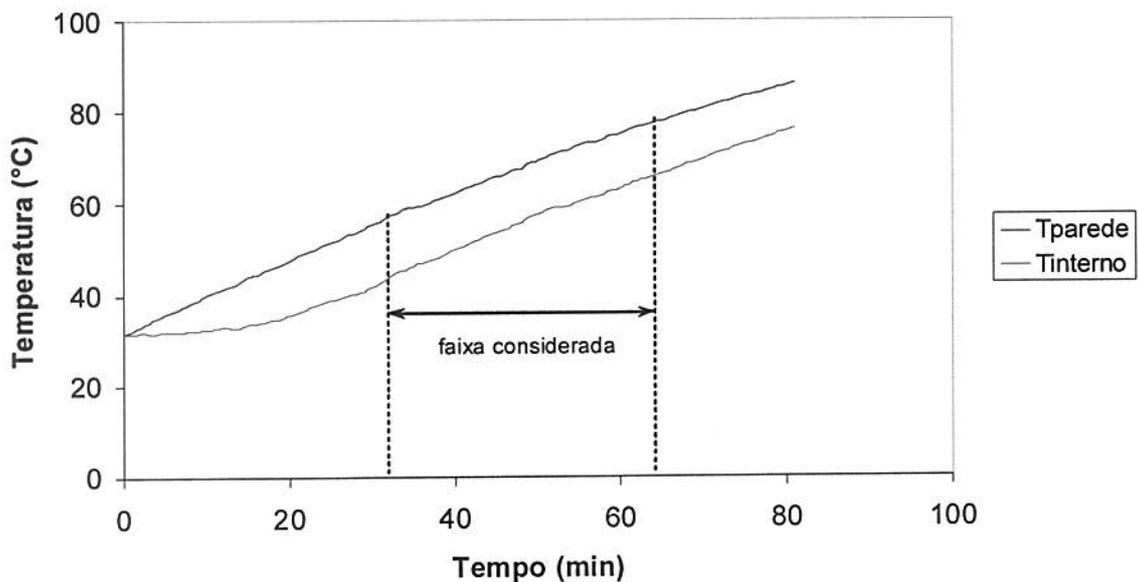


Figura 5 – Curva característica da determinação da difusividade térmica

A equação utilizada foi a Equação 4.2 abaixo:

$$\alpha = \frac{AR^2(T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})}{4} \quad (4.2)$$

onde:

R = raio da célula (m)

T_{int} = temperatura interna (°C)

T_{ext} = temperatura da parede da célula (°C)

A = taxa de aquecimento do banho, calculada através da Equação 4.3:

$$A = \frac{T_{\text{ext}}(t_2) - T_{\text{ext}}(t_1)}{(t_2) - (t_1)} \quad (4.3)$$

sendo $T_{\text{ext}}(t_1)$ e $T_{\text{ext}}(t_2)$ as temperaturas nos instantes de tempo 1 e 2, início e fim da região onde as retas são paralelas, respectivamente.

Desta forma, obtém-se a difusividade média na faixa de temperatura considerada, ou seja, no intervalo de temperatura onde as retas obtidas são paralelas.

4.2.3.4 Calor Específico (c_p)

O calor específico dos cubos de carne manufacturados e da matriz cárnea foi determinado através da equação 4.4:

$$c_p = \frac{k}{\rho\alpha} \quad (4.4)$$

4.3 Equipamentos, Determinação de Parâmetros e Processos Realizados

4.3.1 Autoclave

As amostras foram processadas em uma autoclave horizontal estacionária descontínua da marca Lagarde localizada na Masterfoods do Brasil – Mogi Mirim – SP. A autoclave é cilíndrica, com 1,4m de diâmetro e 7 metros de profundidade. Tem capacidade para 6 cestos de 1,0m³ conforme a figura 6. O cesto para a realização dos experimentos continha 12 bandejas. A bandeja utilizada para o experimento tinha 0,45m x 0,90m de dimensão e era constituída de uma grade com hastes cilíndricas de 4,0mm de espessura, com espaço de 15,0mm de centro a centro. Os experimentos foram todos realizados sobre a décima bandeja, contando de cima para baixo (Figura 7).

Os processamentos foram realizados com o mistura de ar-vapor. As amostras foram processadas a 110, 115 e 121°C com uma relação de 85% vapor e 15% ar, cuidado este requerido no processamento de embalagens flexíveis.

Todos os ensaios deste trabalho foram realizados com a autoclave carregada do cesto 2 ao 6 com embalagens flexíveis, totalizando 714kg de corpo de prova. As embalagens estudadas nos ensaios foram sempre posicionadas conforme pode ser verificado na Figura 8

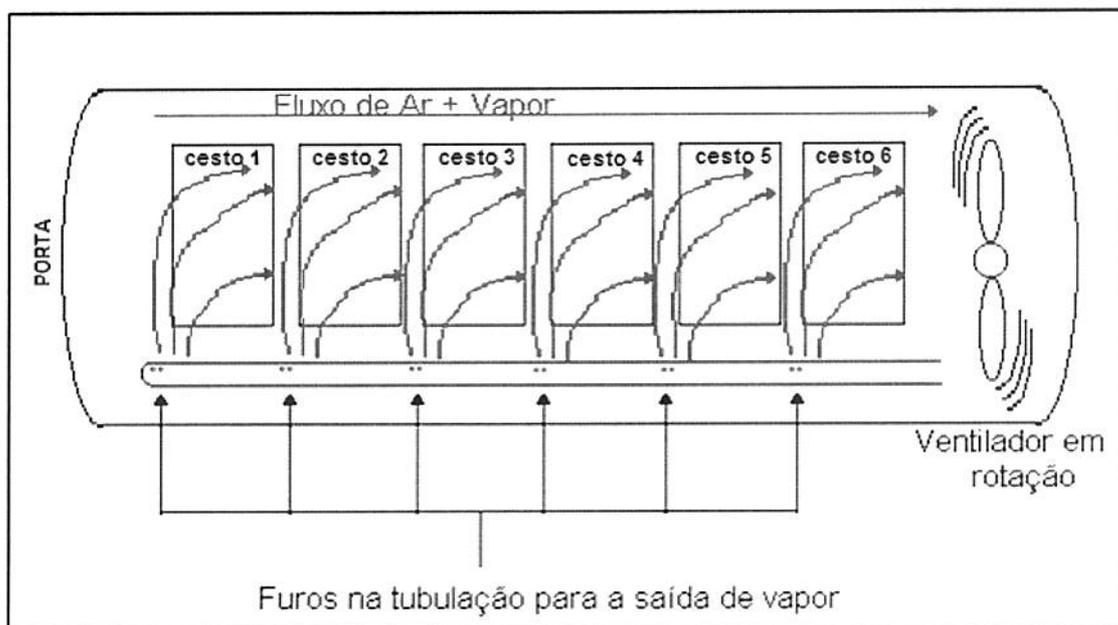


Figura 6 – Desenho esquemático da autoclave horizontal Lagarde com 6 cestos

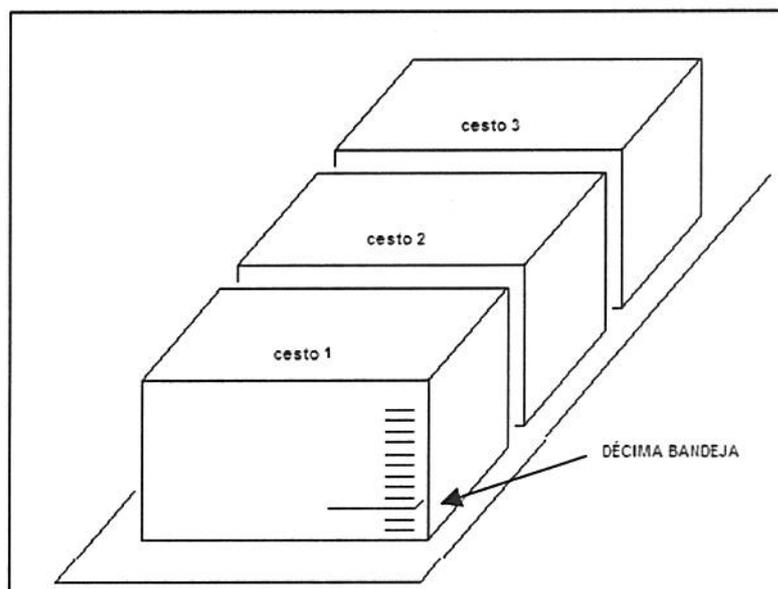


Figura 7 – Posicionamento da décima bandeja do primeiro cesto, junto à porta da autoclave, onde foram realizados os experimentos.

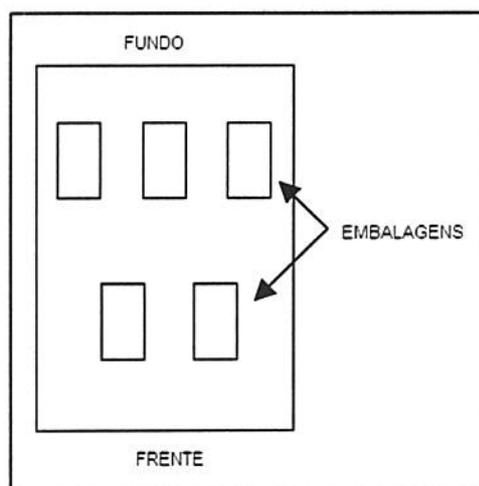


Figura 8 – Disposição das embalagens na bandeja

4.3.2 Preparo das Amostras para o Processamento

Para o preparo dos cubos de carne manufaturados, a emulsão cárnea sempre foi descongelada com 24h de antecedência a 4°C e foi seguido como descrito em 4.2. A emulsão que compõe a matriz cárnea também era descongelada sempre com 24h de antecedência. Cada embalagem foi preenchida com aproximadamente 70 g de cubos de carne manufaturados e 280g da matriz cárnea. Um termossensor rígido Datatrace modelo 4TA, posicionado a 2,4cm do fundo da embalagem era cuidadosamente inserido em um dos cubos de carne, enquanto os outros cubos eram misturados à massa e adicionados nas embalagens flexíveis aleatoriamente, com o cuidado de não contaminar a área de selagem. As embalagens foram seladas com o cuidado de se retirar o ar do interior das mesmas, semelhante às práticas utilizadas na indústria. As embalagens eram colocadas sobre a grade e o sensor remoto era fixado com fita colante sobre um suporte, conforme mostrado na figura 9.



Figura 9 – Esquema de posicionamento de embalagem e sensor remoto de temperatura durante os testes

A própria ponta do sensor era suficiente para manter o cubo de carne suspenso na matriz cárnea. As embalagens foram pesadas antes e após a realização de todos os ensaios descritos a seguir, e só foram considerados os dados daquelas amostras cuja variação de peso foi inferior a 1,0 g. Após o processo, o sensor era cuidadosamente retirado da embalagem, e essa era cortada para retirar o produto coagulado (Fig. 10 e Fig. 11).

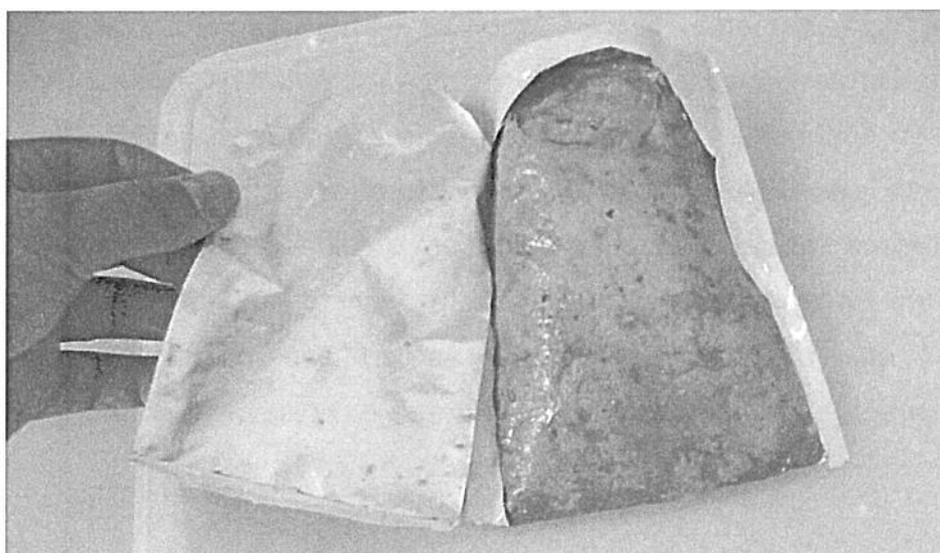


Figura 10 – Corte da embalagem para retirada do produto coagulado



Figura11 – Produto coagulado sem a embalagem flexível

O produto era então cortado ao meio, e a posição da ponta do sensor tinha suas coordenadas X, Y e Z obtidas, como pode ser observado nas figuras 12 e 13.

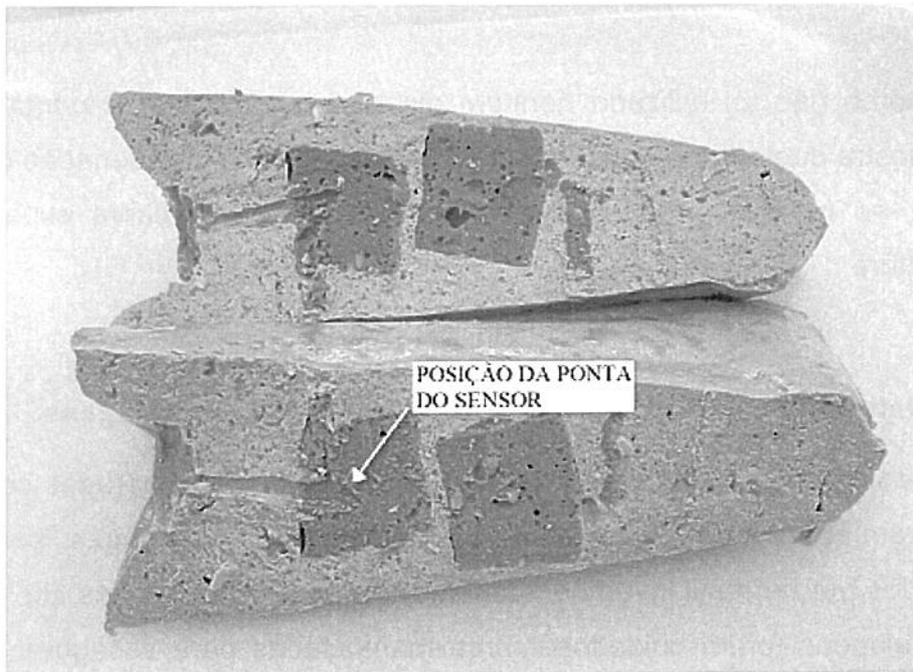


Figura 12 – Produto cortado ao meio mostrando a posição da ponta do sensor

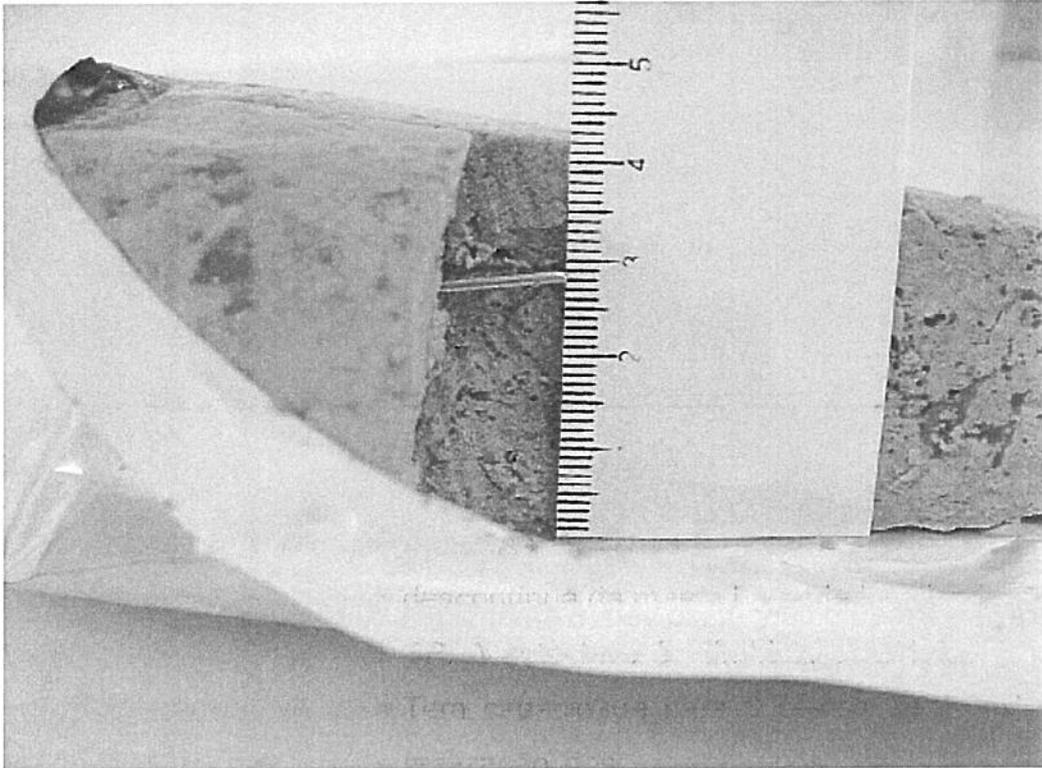


Figura 13 – Produto cortado ao meio mostrando a posição da ponta do sensor

Como não foi utilizado nenhum dispositivo para fixar a ponta do sensor, toda amostra contendo o equipamento foi aberta e suas coordenadas obtidas para localizar no modelo o nó correspondente e obter-se a curva experimental de temperatura

4.3.3 Determinação do Volume de Ar Residual nas Embalagens

Testes destrutivos foram realizados. Embalagens preparadas como no item 4.3.2 foram abertas dentro de um recipiente com água e os gases liberados foram capturados por um funil invertido acoplado a uma proveta, ambos cheios de água. As embalagens foram cuidadosamente manipuladas para assegurar a liberação de todos os gases. A medida do volume de gases foi realizada em mL/embalagem. O teste foi realizado em triplicata.

4.3.4 Calibração dos Termopares

Foram utilizados termopares agulha tipo T de 1 7/8" (4,7 cm) de comprimento e 1/16" de espessura (Ecklund Custom Thermocouples, USA) com conectores C-10 e fios de extensão de cobre-constantan. Estes termopares foram conectados a um aquisitor de dados da marca VersaLogger – 32 Channel Datalogger. Também se utilizou sensores de temperatura remotos da marca Datatrace modelo T4.A, com haste rígida de 7,0cm.

Os termopares e sensores remotos foram calibrados entre 60 e 130°C, variando-se a temperatura de 5 em 5 graus, em um banho digital Cole-Parmer® Polystat® com precisão de $\pm 0,01^\circ\text{C}$ contendo etilenoglicol. A temperatura do RTD do banho foi usada como referência para a calibração e após a estabilização de cada temperatura foram tomadas cinco medidas.

As equações de calibração foram obtidas por regressão linear, utilizando-se o software Microsoft Excel.

Todos os ensaios deste trabalho utilizaram os termopares ou termosensores descritos acima.

4.3.5 Estudo da Distribuição de Temperaturas na região da autoclave utilizada nos ensaios

Foram realizados ensaios para avaliação da homogeneidade da distribuição de temperaturas na bandeja onde os experimentos foram realizados (décima bandeja, de cima para baixo, no primeiro cesto, próximo à porta da autoclave). Foram utilizados sete termopares agulha tipo T, um localizado próximo à entrada de vapor, outro próximo ao nicho do termômetro MIG e os demais distribuídos na altura da grade, nas posições mostradas na Figura 14.

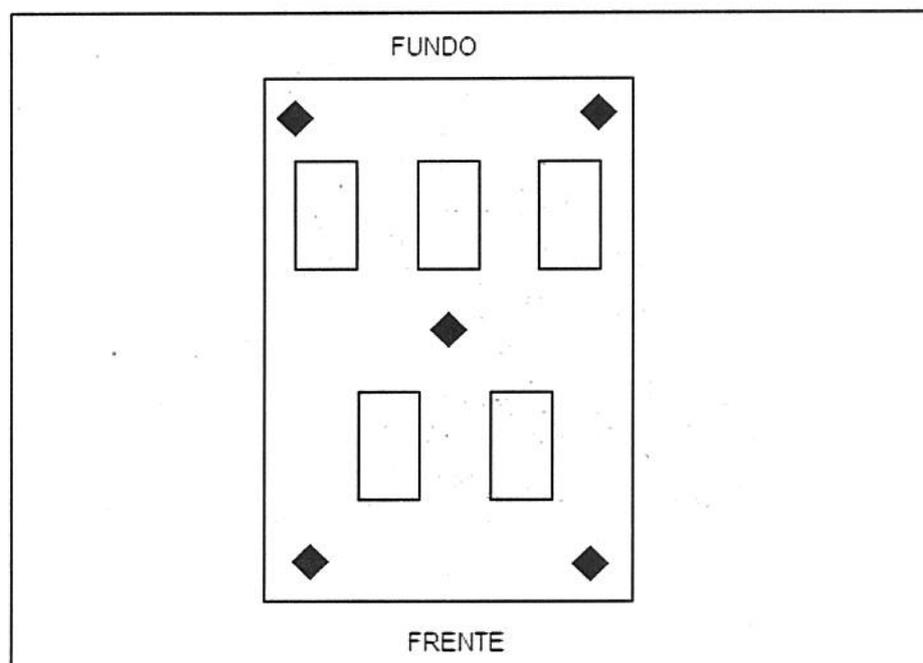


Figura 14 – Posicionamento dos termopares nos ensaios de distribuição de temperaturas na altura da bandeja das amostras (♦ = termopar; □ = embalagem)

Foram realizados dois ensaios a 121°C, com aquisição de temperatura a cada 15 segundos, por 30 minutos após a temperatura da autoclave ter se estabilizado.

Para estes ensaios a autoclave foi carregada conforme o item 4.3.1. Cinco embalagens foram posicionadas na décima bandeja do primeiro cesto contendo uma suspensão de bentonita 10% p/p para simular um alimento condutivo.

Foram pesados 33g de bentonita em pó e adicionadas em uma lata de Folha-de-flandres de 77mm x 95mm. Foi adicionado 297g de água destilada e a lata foi recravada, agitada por 10 minutos e processada a 125°C por 25min por 5 vezes, para que a bentonita fosse completamente hidratada. Entre cada processamento, o produto foi agitado por 10 min. Foram preparadas 10 latas, totalizando 3,3kg de suspensão de bentonita 10% p/p, que foram utilizados nos

experimentos descritos acima. A bentonita foi preparada em latas de Folha-de-flandres apenas por conveniência.

Os dados foram analisados estatisticamente por tempo e por posição, conforme as determinações do NFPA (National Food Processor's Association, Washington, DC, 1985) citadas por Ramaswamy, Campbell e Passey (1991).

O objetivo destes ensaios não foi avaliar a distribuição de temperaturas na autoclave Lagarde utilizada, mas sim assegurar que a distribuição de temperatura era homogênea na região onde as embalagens seriam posicionadas para os ensaios de validação do modelo matemático construído.

4.3.6 Determinação do Coeficiente Convectivo Global 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 a bandeja e a embalagem (CRISTIANINI, 1998).

O Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor (h) foi determinado através da realização de dois ensaios a 121°C. Em cada um destes ensaios a autoclave foi carregada conforme o item 4.3.1. Três embalagens contendo uma suspensão de bentonita 10% (além de outras duas embalagens com a finalidade de atuarem como carga de prova na bandeja) foram processadas.

A difusividade térmica da suspensão de bentonita foi determinada utilizando-se a célula de Dickerson (DICKERSON, 1965).

As temperaturas no interior das embalagens e do meio de aquecimento foram obtidas utilizando-se termopares rígidos. Os termopares que mediam o meio de aquecimento estavam posicionados na região próxima às embalagens. Como condição inicial, foi considerado que a temperatura inicial do produto era uniforme.

O h foi calculado através de uma sub-rotina de otimização do software ANSYS 5.7 (Swanson Analysis Systems, Inc.), o qual utiliza a técnica de elementos finitos para a resolução das equações diferenciais de transferência de calor.

Para o cálculo de h , o processamento térmico foi dividido em 4 partes, sendo elas: início do *come up* (que correspondia aos primeiros 11 minutos do CUT), tempo do Ball (que correspondia a 42% do CUT + o tempo de aquecimento), início do resfriamento (que correspondia aos atingimento da temperatura de 35°C no processo de resfriamento) e final de resfriamento (BHOWMIK; SHIN, 1991), obtendo-se assim valores de h para cada uma destas fases.

A sub-rotina de cálculo de h elaborada utiliza a técnica de otimização *sub problem approximation* explicada no item 4.3.6.1 disponível no software ANSYS.

4.3.6.1 O método *sub problem approximation*

Este método pode ser descrito como método de ordem zero, onde são requeridos apenas os valores das variáveis dependentes e não suas derivadas. Os dois conceitos básicos envolvidos são: o uso de aproximações para as funções objetivas e variáveis dependentes e a conversão de um problema restringido (*constrained problem*) em um problema não restringido (*unconstrained problem*).

Inicialmente, o programa estabelece uma relação entre a função objetiva e as variáveis a serem otimizadas através do ajuste da curva. Isto é feito calculando-se a função objetiva para vários valores da variável a ser otimizada e fazendo-se um ajuste de mínimos quadrados entre os dados. A curva resultante é chamada de aproximação. Cada *looping* da otimização gera um novo dado e a aproximação da função objetiva é atualizada. Esta é a aproximação que é otimizada, ao invés da função objetiva real. As variáveis dependentes são tratadas da mesma forma,

uma aproximação é gerada para cada variável dependente e atualizada a cada *looping*.

A conversão de um problema restringido em um problema não restringido, ou seja, um problema onde existem restrições para os valores que as variáveis podem assumir para um problema onde elas não existem também é feita por esta técnica de otimização. Na formulação do problema, os limites impostos à variável a ser otimizada fazem com que o problema de otimização seja do tipo restringido. O ANSYS converte este problema em um problema de otimização do tipo não restringido, já que a técnica de otimização para problemas do tipo não restringido é mais eficiente. Esta conversão é feita através da adição de penalidades à aproximação da função objetiva para que os limites impostos na formulação do problema sejam considerados no cálculo da variável a ser otimizada. A busca do valor mínimo da aproximação da função objetiva é feita utilizando-se a técnica de minimização seqüencial não restringida (*Sequential Unconstrained Minimization Technique - SUMT*) a cada iteração. Uma explicação detalhada sobre a conversão de problemas de otimização do tipo restringido para não restringido e da técnica SUMT pode ser encontrada em Vanderplaats (1984).

No caso da otimização do valor de h , a sub-rotina implementada considerava como função objetiva o valor de Qui-quadrado (Equação 4.5) e, a partir de um valor inicial de $50 \text{ W/m}^2\text{C}$, o programa calculava através do MEF o perfil de temperatura em determinado ponto da embalagem, comparava este perfil calculado com aquele determinado experimentalmente e calculava o valor de Qui-quadrado. A seguir, o procedimento era repetido para um novo valor de h . O critério de parada era quando o valor de Qui-quadrado (função objetiva) obtido não sofresse uma variação maior que 0,01 alterando-se o valor de h .

O valor de Qui-quadrado representa o módulo da somatória das diferenças entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo ao quadrado dividido pelo valor previsto pelo modelo (Equação 4.5). Assim sendo, quanto mais próximo de zero, mais próximos os dados do modelo estão dos valores reais.

(4.5)

$$Q^2 = \sum_{i=1}^n ((\text{Exp}_i - \text{Mod}_i)^2 / \text{Mod}_i) \quad (4.5)$$

onde Exp_i são valores obtidos experimentalmente e Mod_i são os valores previstos pelo modelo.

Como optou-se por dividir o perfil de temperaturas em 4 partes, inicialmente foi realizada a otimização do valor de h para a região do *come up*. Uma vez definido o valor de h do primeiro trecho, este era mantido constante e passava-se então ao cálculo do h da fase de aquecimento e assim sucessivamente até que os 4 valores de h fossem determinados.

4.3.7 Determinação do Ponto Frio da Embalagem

Foi realizado um ensaio a 121°C para determinação do ponto frio do sistema. A autoclave foi carregada conforme o item 4.3.1. Foram utilizadas três embalagens preenchidas apenas com a matriz cárnea e duas embalagens contendo a suspensão de bentonita 10%, totalizando cinco embalagens, posicionadas conforme mostrado na Figura 15.

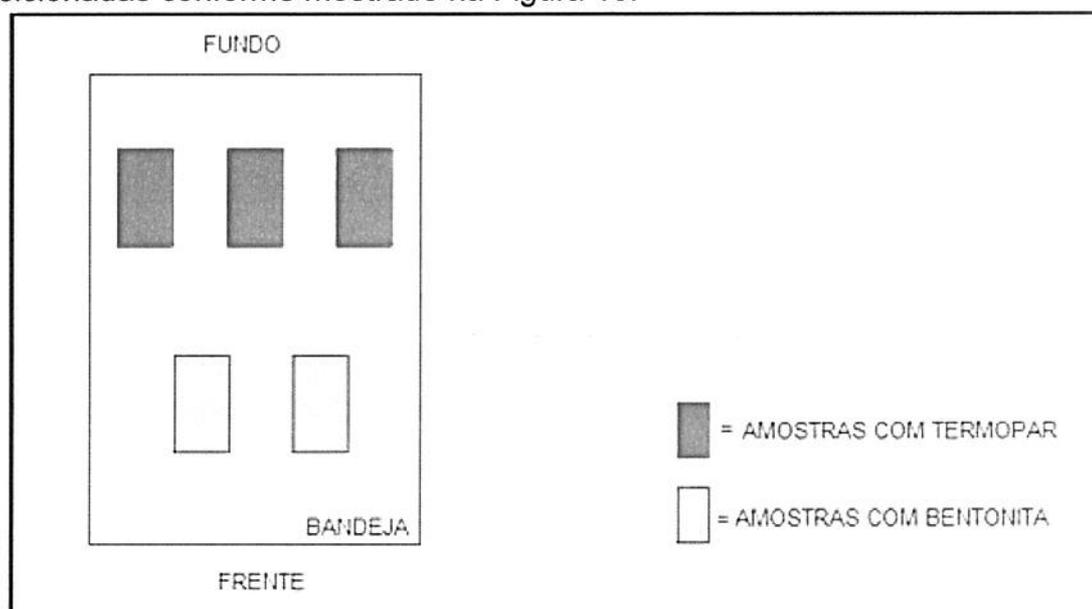


Figura 15 – Esquema de distribuição das amostras nos ensaios de validação do modelo de temperatura

As temperaturas no interior das embalagens com a matriz cárnea foram obtidas em posições aleatórias utilizando-se sensores rígidos de temperatura com conectores apropriados. A temperatura do meio de aquecimento foi medida utilizando-se dois termopares rígidos, posicionados na região próxima às embalagens.

Para a realização do ensaio, as mostras foram descongeladas um dia antes à realização dos experimentos e mantidas sob refrigeração. No dia do experimento, as embalagens foram preenchidas com a matriz cárnea e seladas.

O experimento de determinação do ponto frio foi realizado com a temperatura inicial no interior das embalagens de aproximadamente 26°C.

O ponto frio foi determinado pelas simulações do processo acima realizado, utilizando-se a distribuição de temperatura obtida por um modelo matemático axissimétrico gerado pelo software ANSYS 5.7. O modelo foi validado comparando-se a temperatura obtida pelo modelo com a temperatura real medida.

4.3.8 Determinação da Temperatura no Interior da Embalagem.

Foi construído um modelo matemático com o software ANSYS 5.7, utilizando o MEF. O modelo continha um cubo de carne posicionado na região do ponto frio do sistema, além de outros cubos dispostos aleatoriamente na matriz cárnea. Para validar o modelo de temperatura proposto foram realizados ensaios a 121°C. Em cada processamento foram utilizadas três embalagens contendo o alimento e duas embalagens contendo uma suspensão de bentonita 10%, totalizando sempre cinco embalagens, posicionadas conforme mostrado na Figura 14.

As temperaturas no interior das embalagens foram obtidas utilizando-se sensores rígidos de temperatura com conectores apropriados, sendo que os mesmos ficaram posicionados no interior do cubo de carne, no ponto frio do

sistema. A temperatura do meio de aquecimento foi medida utilizando-se dois termopares rígidos, posicionados na região próxima às embalagens.

Para a realização dos ensaios, as mostras foram descongeladas um dia antes à realização dos experimentos e mantidas sob refrigeração. No dia do experimento, as embalagens foram preenchidas e seladas conforme descrito em 4.3.2. Os experimentos de validação do modelo de temperatura foram realizados com a temperatura inicial no interior das embalagens de aproximadamente 27°C.

4.3.9 Ensaios de Penetração de Calor nas Embalagens Flexíveis

As temperaturas internas de cada embalagem flexível foram obtidas utilizando-se termopares rígidos tipo T e termossensores rígidos. A temperatura do meio de aquecimento também foi medida utilizando-se dois termopares rígidos, posicionados na região próxima às embalagens flexíveis. As embalagens flexíveis foram preparadas conforme descrito em 4.3.2 e foram realizados dois ensaios a 121°C com cinco amostras em cada um deles, totalizando dez resultados, a fim de se obter uma média dos parâmetros, conforme o Campden & Chorleywood Food Research Association, que recomenda a obtenção de no mínimo nove resultados.

A taxa de aquecimento (f_h), taxa de resfriamento (f_c), fator de atraso de aquecimento (j_h) e fator de atraso de resfriamento (j_c) foram calculados utilizando-se o software Microsoft Excel.

Tabela 1 – Parâmetros dos ensaios de penetração de calor

PARÂMETROS DE PROCESSO	ENSAIO 1	ENSAIO 2
Temperatura Inicial do Produto (°C)	18,8	27,2
Temperatura Média de Processo (°C)	122,2	122,5
Tempo de Subida (<i>come up time</i>) (min)	19,0	18,0
Tempo de Aquecimento (min)	30,0	30,0

4.3.10 Determinação dos Parâmetros D e z

Clostridium sporogenes PA3679 foi obtido do Laboratório de Termobacteriologia da Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNICAMP. Esse microrganismo foi escolhido por sua importância no desenvolvimento de processos térmicos para alimentos de baixa acidez e devido aos seus requerimentos fisiológicos serem similares ao do *Clostridium botulinum*. A suspensão de esporos foi produzida seguindo a metodologia dos múltiplos estágios proposta por Goldoni et al. (1980) e estocado a 4°C em tampão fosfato M/15 pH 7,0.

Os parâmetros D e z do *Clostridium sporogenes* foram determinados seguindo a metodologia dos tubos TDT (STUMBO, 1973). O procedimento consistiu em preencher tubos de ensaio de borossilicato de 10 mm de diâmetro externo, 8 mm de diâmetro interno e 10 cm de altura com, aproximadamente, 3,0g da mistura de carne a ser medida, previamente inoculada com aproximadamente $2,6 \times 10^6$ esporos por grama do produto. Os tubos foram selados assepticamente com maçarico e imersos em um banho digital Cole-Parmer® Polystat® com precisão de $\pm 0,01^\circ\text{C}$ contendo etilenoglicol após a temperatura do mesmo ter sido estabilizada. O experimento foi realizado em três temperaturas diferentes: 110, 115 e 118°C. A cada intervalo de tempo pré-estabelecido dois tubos foram retirados e colocado em banhos de gelo por 1 minuto. Estes intervalos de tempo foram determinados com base em valores de D e z deste microrganismo em alimentos semelhantes obtidos da literatura. Na Tabela 2 e 3 podem ser observados os tempos empregados para cada produto.

Tabela 2 – Parâmetros empregados na realização do teste TDT para matriz cárnea

Temperaturas (°C)	Tempos (min) *
110	15,0 / 30,0 / 45,0 / 60,0 / 75,0
115	6,0 / 12,0 / 18,0 / 24,0 / 30,0
118	5,0 / 10,0 / 15, / 20,0 / 25,0

Tabela 3 – Parâmetros empregados na realização do teste TDT para as carnes utilizadas para a preparação dos cubos de carne manufacturados

Temperaturas (°C)	Tempos (min) *
110	15,0 / 30,0 / 45,0 / 60,0 / 75,0
115	8,0 / 16,0 / 24,0 / 32,0 / 40,0
118	4,0 / 8,0 / 12,0 / 16,0 / 20,0

*Obs.: os tempos são apresentados já descontando-se o atraso térmico dos tubos de 2 minutos.

Os tubos foram abertos assepticamente em câmara de fluxo laminar e através de diluições decimais sucessivas fez-se plaqueamento em profundidade em duplicata no meio MPA3679 (GRISCHY; SPECK; ADAMS, 1983). As placas foram incubadas em estufa a 35°C e a contagem do número de colônias foi feita após 48-72 horas de incubação.

Um tubo preparado da mesma forma que os demais foi utilizado como controle da população inicial de microrganismos. Este tubo foi submetido a um choque térmico de 13 minutos em banho de água a 82°C para que os esporos fossem ativados (GOLDONI et al., 1980).

Anteriormente à realização dos experimentos, o atraso térmico em cada uma das temperaturas foi determinado, para cada produto, utilizando-se um tubo com um termopar flexível tipo T (Omega TT-T30) posicionado no centro do mesmo. O termopar foi conectado a um aquisitor de dados da marca Omega

modelo CL-526. Os tubos foram preenchidos com 3,0g do alimento, selados e imersos em um banho com propilenoglicol em cada uma das três temperaturas empregadas no teste TDT por três vezes em cada uma delas. Verificou-se o tempo necessário para que a temperatura no centro do mesmo atingisse a temperatura do banho, ou seja, o tempo de atraso dos tubos.

Conhecendo-se o tempo de imersão e o número de sobreviventes em cada um destes tempos foi possível calcular o valor D em cada uma das temperaturas.

O tempo de atraso foi descontado dos tempos de imersão, quando se realizaram os cálculos do parâmetro D. Conhecendo-se o valor D do microrganismo no alimento em três temperaturas diferentes foi possível determinar o valor do parâmetro z a partir da curva fantasma.

4.3.11 Cálculo da Esterilização Média da Massa

O cálculo da esterilização média da massa foi feito conforme apresentado por Cristianini (1998).

A cinética de primeira ordem da destruição térmica de microrganismos pode ser descrita por:

$$-\frac{dC}{dt} = \frac{1}{D} C \quad (4.6)$$

onde C representa a concentração inicial de microrganismos e D o tempo de redução decimal. Rearranjando-se os termos e integrando no tempo, obtém-se:

$$C^{(t+\Delta t)} = C^{(t)} + 10^{(-\Delta t/D)} \quad (4.7)$$

Neste trabalho considerou-se um Δt de 15 segundos.

O valor D varia em função da temperatura e pode ser escrito como:

$$\frac{dD}{dT} = \frac{1}{z} D \quad (4.8)$$

onde T é a temperatura e z o coeficiente térmico. Rearranjando-se a Equação 4.8 obtém-se:

$$D = D_r 10^{(T_r - T)/z} \quad (4.9)$$

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

O modelo tridimensional de temperaturas gerado fornece a distribuição de temperaturas em todo o volume do recipiente. A temperatura de cada elemento é calculada através da média das temperaturas dos nós do elemento. Tendo-se a temperatura média de cada elemento é possível calcular o valor D e consequentemente a concentração de microrganismos em cada elemento a cada intervalo de tempo. Desta forma, a concentração final de microrganismos em determinado elemento em um dado instante, é igual à concentração inicial de microrganismos no elemento no instante seguinte e assim sucessivamente. A somatória do número de sobreviventes em cada um dos elementos fornece a concentração final de microrganismos na amostra (C) e o valor da esterilização média da massa (F_m) pode ser calculado pela seguinte equação:

$$F_m = D_r \log(C_o / C) \quad (4.10)$$

onde C_o e C são as concentrações inicial e final de microrganismos na amostra, respectivamente.

4.4 Modelamento Matemático do Perfil de Temperatura no Interior da Embalagem

Foi elaborado um modelo matemático tridimensional e axissimétrico para a análise do processamento térmico das bolsas, que continham cubos de carne em uma matriz cárnea, através do software ANSYS 5.7 (Swanson Analysis Systems,

Inc.), o qual utiliza a técnica de elementos finitos para a resolução das equações diferenciais de transferência de calor.

O modelo de temperaturas foi construído considerando-se as reais características geométricas da embalagem. Para isso, uma embalagem foi processada, cortada em fatias e um desenho da mesma foi realizada em papel milimetrado. A partir das medidas obtidas, um modelo axissimétrico e tri-dimensional da embalagem foi gerado com software ANSYS. O modelo construído apresentou 5118 nós (2874 elementos), quando a malha foi construída. As simulações foram realizadas utilizando-se um microcomputador PC com processador Pentium 3 de 750 MHz e 128 Mb de memória RAM. A Figura 16 apresenta a comparação entre a embalagem processada, o produto sem a embalagem e o sólido construído pelo software. Como pode ser observado, a base do modelo é elíptica, pois representa apenas o produto, sem considerar embalagem sobressalente inferior, característica das embalagens tipo *stand up pouch*.

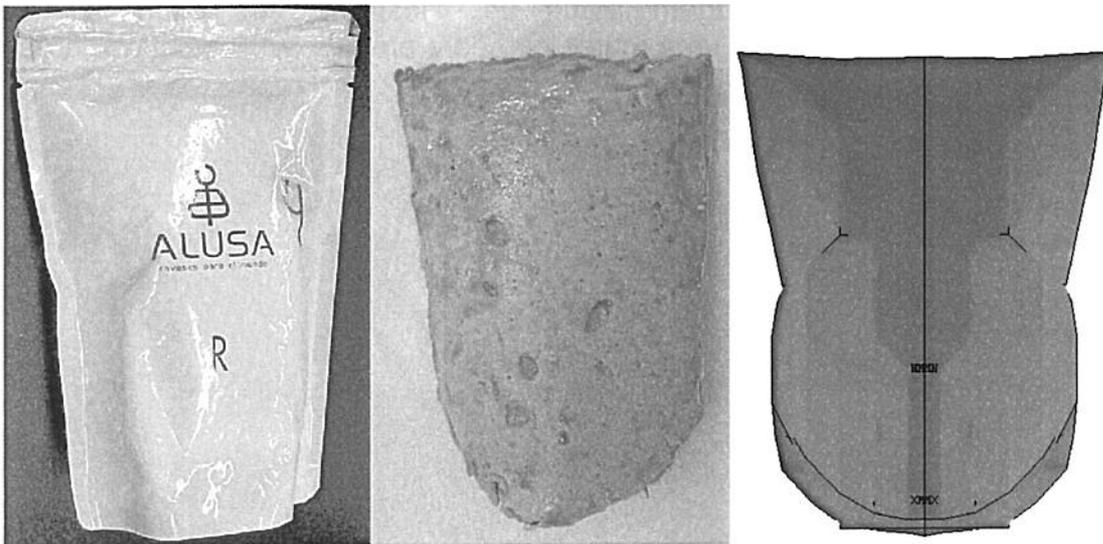


Figura 16 – Comparação entre a embalagem processada, o produto sem a embalagem e o modelo construído pelo software ANSYS.

A figura 17 apresenta o sólido, com os cubos de carne entremeados na matriz cárnea e a posição dos cubos de carne no espaço. A Figura 18 apresenta o produto real em seu corte transversal.

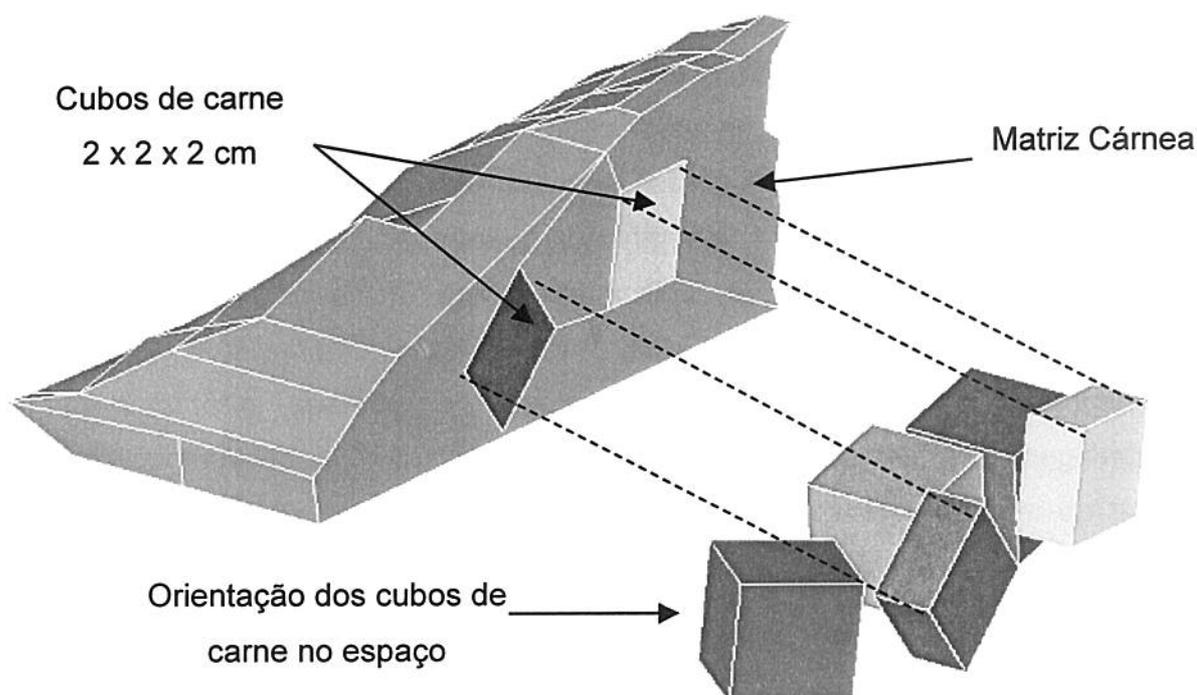


Figura 17 – Sólido construído pelo software ANSYS 5.7, correspondente à metade de uma embalagem *stand up*, mostrando os cubos de carne entremeados em uma matriz cárnea e orientação dos cubos no espaço

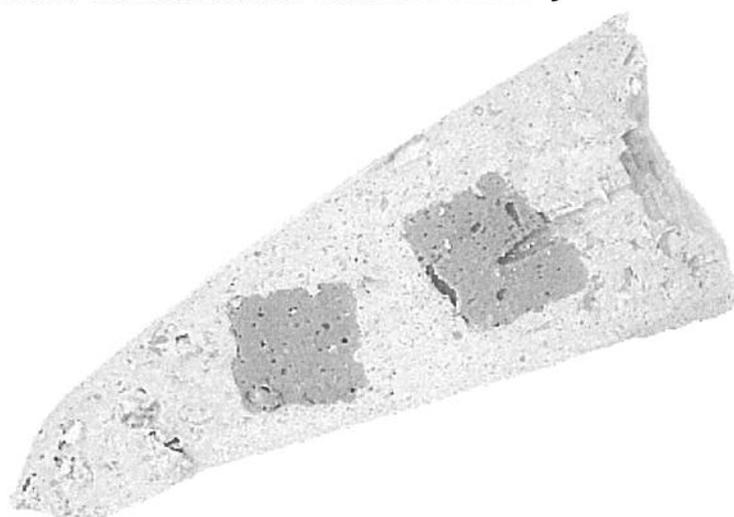


Figura 18 – Produto real mostrando os cubos de carne entremeados na matriz cárnea

Foi utilizado o elemento SOLID 90, do software ANSYS, pois, conforme pode ser observado na Figura 19, o mesmo apresenta a capacidade de se deformar, podendo assumir o formato de um tetraedro, de uma pirâmide ou de um prisma, dependendo da geometria do sólido a ser mapeado.

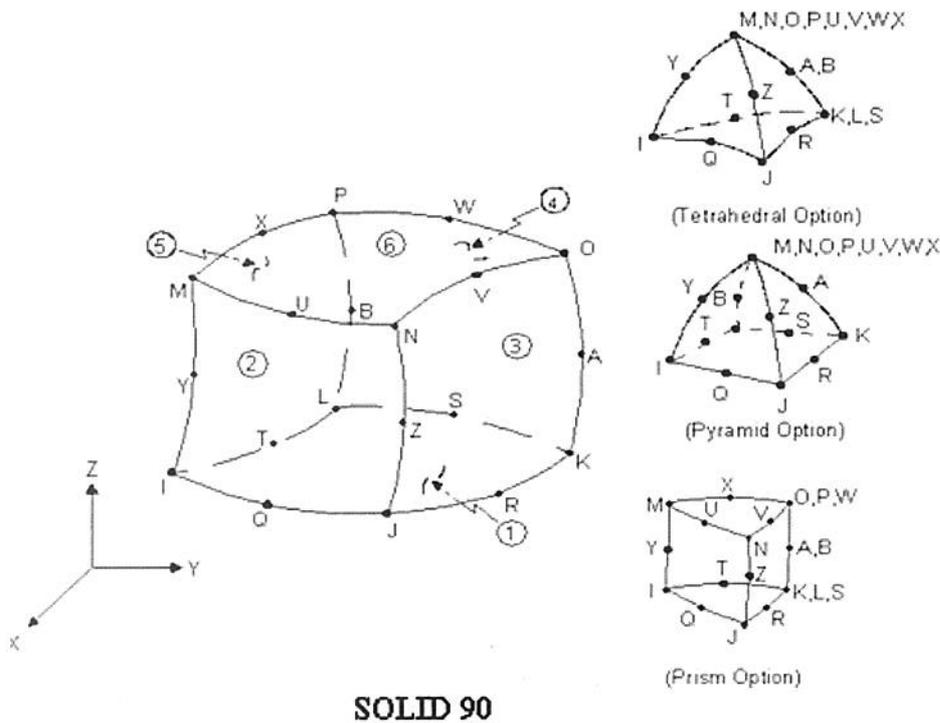


Figura 19 – Elemento térmico da biblioteca do software ANSYS

Para o modelamento da embalagem foram consideradas as diferentes propriedades térmicas do cubo de carne manufacturado e da matriz cárnea separadamente. As condições de contorno aplicadas para a resolução das equações diferenciais de transferência de calor foram a temperatura inicial da amostra (considerada constante e uniforme) e o perfil de temperaturas real da autoclave durante o processamento (temperaturas adquiridas a cada minuto), desconsiderando a resistência térmica da embalagem (Biot tendendo à nulidade).

Este perfil correspondia à média das temperaturas obtidas por dois termopares rígidos posicionados no interior da autoclave, na região próxima às embalagens.

4.5 Ensaios de Validação do Modelo de Destruição Microbiológica

Foram realizados ensaios de validação microbiológica do modelo proposto a 110°C e 115°C. As amostras foram inoculadas com a suspensão de *Clostridium sporogenes* PA 3679 citada no item 4.3.8. A inoculação foi feita de modo que a concentração inicial fosse de aproximadamente 10^6 esporos/g de amostra. A suspensão de esporos produzida foi da ordem de 10^8 esporos/mL e decidiu-se inocular 1 mL de suspensão a cada 100 g de produto para que as propriedades térmicas do mesmo não fossem alteradas.

Para a realização dos ensaios, as mostras foram descongeladas um dia antes à realização dos experimentos e mantidas sob refrigeração. No dia do experimento, as amostras foram inoculadas, as embalagens foram preenchidas e seladas conforme descrito em 4.3.2. Os experimentos de validação do modelo de temperatura foram realizados com a temperatura inicial no interior das embalagens de aproximadamente 27°C.

Amostras dos produtos inoculados atuaram como controle da concentração inicial de microrganismos. Essas amostras foram submetidas a uma contagem em meio MPA 3679 (GRISCHY; SPECK; ADAMS, 1980), após choque térmico (82°C por 13 minutos), quando do plaqueamento das embalagens flexíveis processadas.

Foram realizados dois experimentos com quatro amostras inoculadas e uma amostra em embalagem com termopar em cada temperatura. A distribuição das embalagens flexíveis no interior da autoclave pode ser observada na Figura 20.

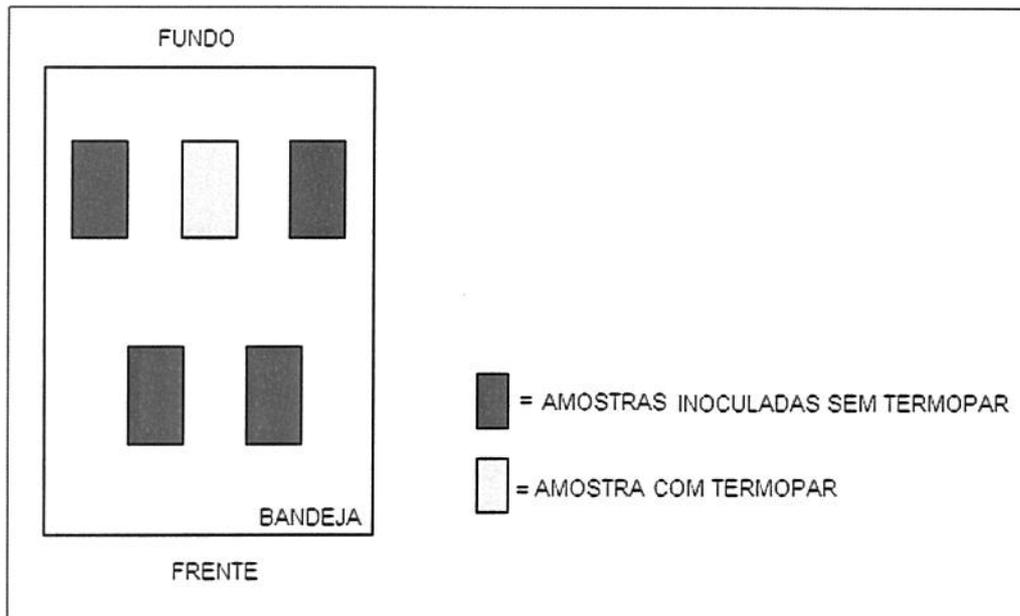


Figura 20 – Esquema de distribuição das amostras nos ensaios de validação do modelo de destruição microbiológica

Os ensaios foram realizados com processo ar-vapor, com sobrepressão de ar pelos motivos já explicados. Em todos os experimentos, havia sempre uma embalagem com um termossensor rígido. Esta embalagem tinha por finalidade atuar como controle da temperatura do produto. As embalagens flexíveis foram fixadas na bandeja da autoclave. A temperatura do meio de aquecimento foi medida por dois termopares rígidos posicionados na região próxima às embalagens e um termopar foi posicionado junto ao sensor de temperatura da autoclave.

Os ensaios de validação do modelo de destruição microbiológica foram determinados para que o processo fosse sub letal, ou seja, deveriam restar microorganismos sobreviventes para a realização de contagem e comparação com o efeito do processamento térmico na destruição dos mesmos. Foram realizadas simulações para que fosse estimado o tempo adequado de processo em cada uma das temperaturas testadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização da Amostra

5.1.1 Composição Centesimal do Produto

A composição centesimal da emulsão utilizada para produzir os cubos de carne manufaturados e da matriz cárnea, provenientes de um mesmo lote fornecido pela Masterfoods do Brasil LTDA pode ser verificada nas Tabelas 4 e 5 abaixo, respectivamente. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

Tabela 4 – Composição Centesimal de Cubos de Carne Manufaturados

Análise	Média	DP	CV (%)
Umidade	55,0	0,7	1,4
Proteínas	8,8	0,5	5,5
Lipídeos	19,7	0,6	3,1
Cinzas	5,5	0,4	7,0
Carboidratos Totais	11,0	0,5	4,4

Tabela 5 – Composição Centesimal da Matriz Cárnea

Análise	Média	DP	CV (%)
Umidade	72,5	0,7	1,0
Proteínas	4,9	0,2	4,7
Lipídeos	11,2	0,3	2,7
Cinzas	4,1	0,2	4,9
Carboidratos Totais	7,3	1,0	13,0

Os valores médios encontrados demonstram uma grande diferença entre os dois produtos, principalmente teores de umidade e lipídeos que para produtos cárneos têm grande influência nas propriedades termofísicas.

Sandberg et al. (1994) determinaram a composição centesimal de um emulsionado de presunto e encontraram os seguintes resultados: 71,0% de umidade, 21,3% de proteína, 6,7% de gordura e 1,0% de cinzas.

Chang e Carpenter (1998) analisaram a composição centesimal de um emulsionado de carne tipo Frankfurter encontrando valores de umidade de 63,1% a 68,5%, proteína de 13,3% a 15,0%, gordura de 11,7% a 15,3%, cinzas de 2,8% a 4,2% e carboidratos de 1,4% a 3,9%.

As características marcantes que diferenciam os produtos deste estudo dos emulsionados encontrados na literatura são os menores teores de proteína e maiores teores de cinzas e carboidratos.

5.1.2 Carga Microbiana Inicial

O resultado obtido quando se realizou a determinação da carga microbiana inicial através de uma contagem total de mesófilos aeróbios em placas foi de $7,6 \times 10^5$ UFC/g de amostra. Já na contagem total de mesófilos anaeróbios em placas foi de $4,6 \times 10^5$ UFC/g. Para contagem de termófilos, verificou-se contagem $< 1,0 \times 10^2$ UFC/g tanto para aeróbios quanto para anaeróbios.

Garcia Zepeda et al. (1997) realizaram contagem em placa de aeróbios e contagem de células vegetativas viáveis de *Clostridium sporogenes* PA 3679 em um produto a base de coração bovino, carne bovina e farinha de trigo. Os autores não encontraram células de *Clostridium sporogenes* a um nível de detecção mínima de 5,0 UFC/g nas matérias primas. As contagens em placa para aeróbios foram de $1,9 \times 10^6$, $1,9 \times 10^7$ e $3,8 \times 10^5$ UFC/g em coração bovino, carne bovina e farinha de trigo respectivamente.

5.1.3 Propriedades Térmicas

5.1.3.1 Condutividade Térmica (k)

A condutividade térmica dos cubos de carne manufacturados foi determinada na faixa de 2 a 72°C pelo método da sonda. Os resultados obtidos podem ser verificados na Figura 21.

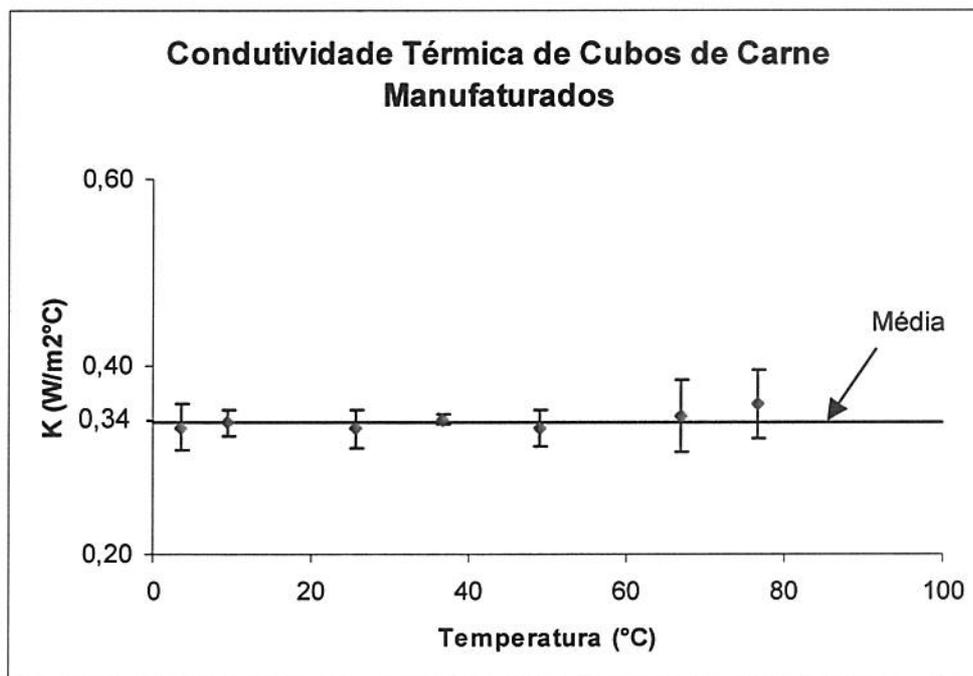


Figura 21 – Determinação do valor da condutividade térmica da amostra de cubos de carne manufacturados

O valor médio encontrado foi de 0,34 W/m°C, o desvio padrão médio 0,02 W/m°C e o coeficiente de variação 6,7%.

Pela figura 21 observa-se que, na faixa de temperatura estudada, houve apenas uma pequena variações em torno do valor médio de condutividade obtido. Portanto, a fim de simplificar o modelamento matemático proposto, a condutividade dos cubos de carne foram consideradas constantes.

Utilizando-se uma fórmula para prever condutividade térmica de carnes e peixes, desenvolvida por Sweat (1975) apresentada por Rao e Rizvi (1986), baseada na umidade do produto, o valor obtido foi de $0,37\text{W/m}^\circ\text{C}$ (Equação 5.1).

$$k = 0,08 + 0,52X_w \quad (5.1)$$

onde X_w = fração mássica de água.

Unklesbay et al. (1992) determinaram valores de condutividade de uma mistura de carne, farinha de milho e soja utilizando uma sonda linear. A umidade do produto variou entre 43,3% e 47,7% e os valores de condutividade encontrados variaram entre 0,32 e 0,39 $\text{W/m}^\circ\text{C}$.

Baghe-Khandan, Okos e Sweat (1982) realizaram análises de condutividade térmica de diversos tipos de carne utilizando o método da sonda linear. Para costela bovina moída, com umidade variando entre 43,9% e 57,8%, o valor de condutividade térmica variou entre 0,368 e 0,450 $\text{W/m}^\circ\text{C}$.

A figura 22 apresenta os resultados obtidos para a determinação da condutividade térmica da matriz cárnea na faixa de 17 a 82°C pelo método do sensor.

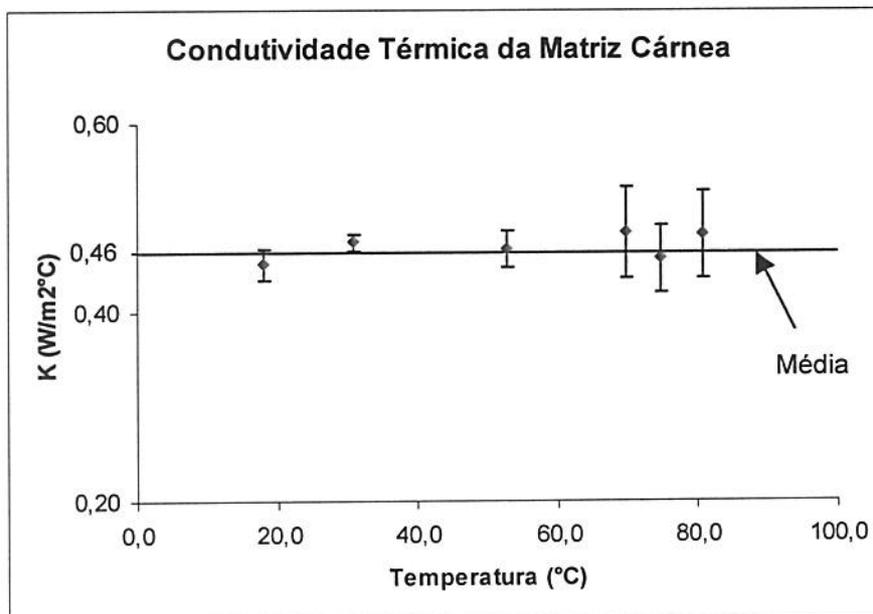


Figura 22 – Determinação do valor da condutividade térmica da amostra da matriz cárnea

O valor médio encontrado foi de 0,46 W/m°C, o desvio padrão médio 0,04 W/m°C e o coeficiente de variação 7,6%.

Pode-se observar pela figura 22 que na faixa de temperatura estudada, assim como ocorreu com os cubos de carne, houve apenas pequenas variações em torno do valor médio. Portanto, a fim de simplificar o modelamento matemático proposto, a condutividade dos cubos de carne foram consideradas constantes.

Utilizando-se a fórmula desenvolvida por Sweat (1975) apresentada por Rao e Rizvi (1986) o valor obtido foi de 0,46W/m°C.

Tsai et al. (1998) determinou valores de condutividade de carne moída reestruturada utilizando o método da sonda linear. Nos experimentos, os autores verificaram que a umidade variou entre 71,5% e 75,5% e os valores de condutividade encontrados variaram entre 0,448 e 0,462 W/m°C.

Oliveira et al. (2005) utilizou a sonda linear para determinar a condutividade de presunto cozido. A composição centesimal do produto era: 72,5% de umidade, 16,9% de proteína, 6,9% de gordura e 3,7% cinzas, apresentando uma condutividade térmica de 0,46 W/m°C.

Os valores encontrados neste trabalho para a condutividade térmica estão próximos dos valores citados na literatura para alimentos cárneos de composição centesimal semelhante, demonstrando que o equipamento utilizado mediu a propriedade satisfatoriamente.

5.1.3.2 Densidade (ρ)

A tabela 6 apresenta os resultados de densidade encontrados para os cubos de carne e mistura cárnea.

A determinação foi realizada em 10 amostras de cada produto, na faixa de 25 a 30°C.

Tabela 6 – Densidade dos Cubos de carne manufacturados e da mistura de carnes

Produto	Cubos de carne manufacturados (kg/m ³)	Matriz cárnea (kg/m ³)
Média	1082,9	1002,0
Desvio Padrão	42,3	27,2
CV (%)	3,9	2,7

Verifica-se na tabela 6 que a o maior valor de densidade foi encontrado no produto com menor teor de umidade e maior teor de proteína (cubos de carne). Oliveira et al. (2005) relatou a mesma propriedade para presunto cozido. Segundo os autores, este efeito ocorre pelo peso molecular da água ser menor do que o da proteína. Este resultado contradiz alguns autores, que verificaram que um decréscimo na umidade de produtos cárneos processados foi seguido de um decréscimo na densidade. Porém, o processamento permitia a perda da umidade, aumentando espaços vazios no interior da amostra (PEREZ; CALVELO, 1984; TSAI et al., 1998).

Os testes de densidade realizados para os cubos de carne e matriz cárnea foram realizados com o produto cru, e não houve perda de umidade durante o processamento térmico por estarem confinados à embalagem selada. Portanto, os valores utilizados neste trabalho serão considerados constantes.

Unklesbay et al. (1992) determinaram valores de densidade de uma mistura de carne, farinha de milho e soja e os valores encontrados variaram entre 1036 e 1150 kg/m³.

Mc Donald, Sun e Lyng (2002) determinaram valores de densidade um produto a base de carne, cozido e resfriado por diferentes tratamentos. Os valores variaram de 1039,6 a 1084,5 kg/m³.

Portanto os valores obtidos estão coerentes com os valores da literatura.

5.1.3.3 Difusividade Térmica (α)

A difusividade térmica das amostras foi determinada em quintuplicata e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores experimentais de difusividade térmica

Produto	Cubos de carne manufaturados (m^2/s)	Matriz cárnea (m^2/s)
Média	$1,08 \times 10^{-7}$	$1,36 \times 10^{-7}$
Desvio Padrão	$0,04 \times 10^{-7}$	$0,05 \times 10^{-7}$
CV (%)	4,1	3,8

Oliveira et al. (2005) desenvolveram uma fórmula (Equação 5.2) para prever a difusividade térmica de presunto cozido baseada na umidade do produto. Utilizando esta mesma fórmula para os cubos de carne, o valor obtido foi de $1,12 \times 10^{-7} m^2/s$.

$$\alpha = 0,7162 \times 10^{-7} + 0,007437 \times 10^{-7} W \quad (5.2)$$

onde W = conteúdo de umidade em %

Utilizando-se a mesma fórmula para a matriz cárnea, o valor de difusividade térmica obtido foi de $1,26 \times 10^{-7} m^2/s$.

Unklesbay et al. (1992) determinaram a difusividade térmica de uma mistura de carne, farinha de milho e soja. A umidade do produto variou entre 43,3% e 47,7% e os valores de difusividade encontrados variaram entre $0,8 \times 10^{-7}$ e $1,2 \times 10^{-7} m^2/s$.

Dickerson e Read (1975 apud SINGH, 1982) encontraram valores de difusividade para diversos tipos de carne bovina. A umidade variou entre 66,0% e

71,0% e os valores de difusividade encontrados variam entre $1,23 \times 10^{-7}$ e $1,33 \times 10^{-7}$ m^2/s .

Mitra et al. (1995 apud CARCIOFI, 2002) determinaram a difusividade térmica para um emulsionado de carne tipo mortadela. Os valores variaram entre $1,28 \times 10^{-7}$ e $1,52 \times 10^{-7}$ m^2/s . Os autores não determinaram a composição centesimal do produto.

Markowski et al. (2004) determinaram a difusividade térmica para uma emulsão cárnea tipo salsicha Lyoner. A umidade do produto variou entre 66,0% e 72,0% e o teor de gordura variou entre 8,9 e 26,3%. A difusividade variou entre $1,35 \times 10^{-7}$ e $1,53 \times 10^{-7}$ m^2/s .

Assim como ocorreu com condutividade térmica, a difusividade térmica dos cubos de carnes e da matriz cárnea determinados neste trabalho apresentaram valores próximos aos encontrados na literatura para produtos cárneos com composição centesimal semelhantes. O valor de difusividade variou principalmente com a variação de umidade do produto.

5.1.3.4 Calor Específico (c_p)

O Calor Específico foi calculado utilizando-se os valores das demais propriedades térmicas determinadas experimentalmente, através da Equação 4.4:

$$c_p = \frac{k}{\rho\alpha}$$

Para os cubos de carne, os valores médios determinados das propriedades térmicas são apresentados abaixo:

$$k = 0,34 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\rho = 1082,9 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha = 1,08 \text{ E-7 m}^2/\text{s}$$

O valor de calor específico encontrado para os cubos de carne utilizando-se a equação 4.4 foi de 2,91 kJ/kg°C.

Utilizando-se uma fórmula geral baseada na composição centesimal do produto, desenvolvida por Heldman e Singh (1981) e apresentada por Rao e Rizvi (1986), o valor obtido foi de 2,97 kJ / kg°C (Equação 5.3).

$$C_p = 1,424 m_c + 1,549 m_p + 1,675 m_f + 0,837 m_a + 4,187 m_m \quad (5.3)$$

onde:

m_c = fração mássica de carboidratos

m_p = fração mássica de proteínas

m_f = fração mássica de gorduras

m_a = fração mássica de cinzas

m_m = fração mássica de água

Para a matriz cárnea, os valores médios determinados das propriedades térmicas são apresentados abaixo:

$$k = 0,46 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\rho = 1002,0 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha = 1,36 \text{ E-7 m}^2/\text{s}$$

O valor de calor específico encontrado para a matriz cárnea utilizando-se a fórmula 4.4 foi de 3,41 kJ/kg°C.

Utilizando-se a fórmula desenvolvida por Heldman e Singh (1981) e apresentada por Rao e Rizvi (1986), o valor obtido foi de 3,43 kJ / kg°C.

A semelhança dos valores obtidos pela equação 4.4 com os valores encontrados na literatura demonstra que os valores das propriedades térmicas determinados experimentalmente neste trabalho estão coerentes. A fim de

simplificar o modelo matemático proposto, todos os valores experimentais obtidos serão considerados constantes, não dependentes da temperatura.

5.2 Equipamentos, Determinação de Parâmetros e Processos Realizados

5.2.1 Determinação do Volume de Ar Residual nas Embalagens

Para a selagem manual do produto, tomou-se o cuidado em retirar a maior quantidade possível de ar da embalagem, evitando-se sujar a área de solda, o que causava defeito na mesma.

Uma vez estabelecidas as condições de selagem, um ensaio com três embalagens foi realizado para verificar-se o volume de ar residual no interior das mesmas. A média encontrada foi de 7,3mL de ar residual por embalagem, com desvio padrão de 1,0mL. A tabela 8 abaixo apresenta os valores de ar residual em três embalagens com a média e desvio padrão.

Tabela 8 – Valores experimentais de ar residual

	Produto (g)	Ar Residual (mL)
1	350,5	6,5
2	349,9	8,5
3	350,8	7
Média	350,4	7,3
Desvio Padrão	0,5	1,0

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.

Campbell e Ramaswamy (1992) determinaram a influência da quantidade de ar residual na mudança na localização do ponto frio e da letalidade em um

simulante de alimento à base de silicone em bolsas de 21 x 14cm. Segundo os autores, foi verificado que a mudanças na localização do ponto frio e da letalidade do produto ocorreu quando o volume de ar residual era superior a 20,0mL. Os autores pontuaram também que diversas variáveis contribuem para que uma determinada quantidade de ar tenha efeito negativo na taxa de aquecimento de uma embalagem flexível (o tamanho da embalagem, o formato da embalagem, o formato e tamanho do alimento acondicionado, o método de empacotamento, a temperatura de processo e o tipo do meio de aquecimento) e que regras gerais não existem. Os autores concluíram que a determinação acurada do efeito da quantidade de ar em uma embalagem flexível requer uma avaliação de todos os fatores acima em uma determinada aplicação.

Weintraub, Ramaswamy e Tung (1989) estudaram a influência do ar residual em processamento térmico de bolsas flexíveis. Os autores verificaram que para processos ar-vapor com sobrepressões acima de 0,8 bar, até 30mL de ar residual não tiveram efeitos negativos nas taxas de aquecimento. Porém relataram também de apenas 5 mL de ar residual são capazes de modificar a transferência de calor em processos com sobrepressões abaixo de 0,4 bar.

Neste trabalho, os processos a 110°C sofreram sobrepressão de 0,30 bar, os processos a 115°C sofreram sobrepressão de 0,40 bar e os processos a 121°C sofreram sobrepressão de 0,47 bar. As taxas de sobrepressão foram suficientes para evitar danos às embalagens, porém, não se pode afirmar que a sobrepressão utilizada influenciou as taxas de aquecimento do produto.

5.2.2 Estudo da Distribuição de Temperaturas na região da autoclave utilizada nos ensaios

Segundo Ramaswamy, Campbell e Passey (1991), a recomendação do NFPA (National Food Processor Association, USA), é que um minuto após a temperatura de processo ter sido atingida, a diferença máxima de temperaturas entre quaisquer pontos dentro de uma autoclave não seja superior a 1,7°C, sendo

que as temperaturas devem estar em uma faixa de no máximo 0,9°C da temperatura de referência.

A Tabela 9 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos dois ensaios de distribuição de temperaturas na região da autoclave onde foram realizados os experimentos. Os ensaios foram realizados a 121°C. Nas Figuras 23 e 24 a seguir podem ser observados os gráficos de distribuição de temperaturas da autoclave por posição.

Tabela 9 – Resultados da distribuição de temperaturas na décima bandeja do primeiro cesto

PARÂMETROS	ENSAIO 1	ENSAIO 2
Temperatura média da autoclave (°C)	121,2	121,3
Desvio padrão entre médias	0,1	0,1
Diferença máxima entre um ponto e MIG	0,5	0,5
Diferença máxima entre dois pontos	1,0	1,0
Ponto de Aquecimento mais Lento	Centro	Frente / Esquerda
Temperatura Média da Posição mais Fria (°C)	121,0	121,2

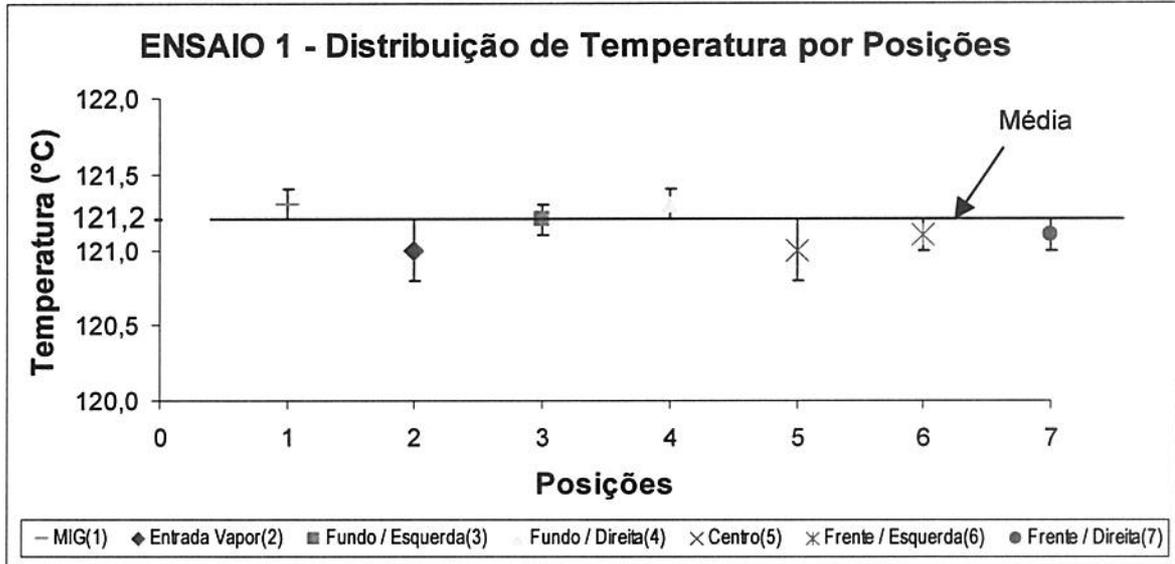


Figura 23 – Ensaio 1 de distribuição de temperaturas na décima bandeja do primeiro cesto

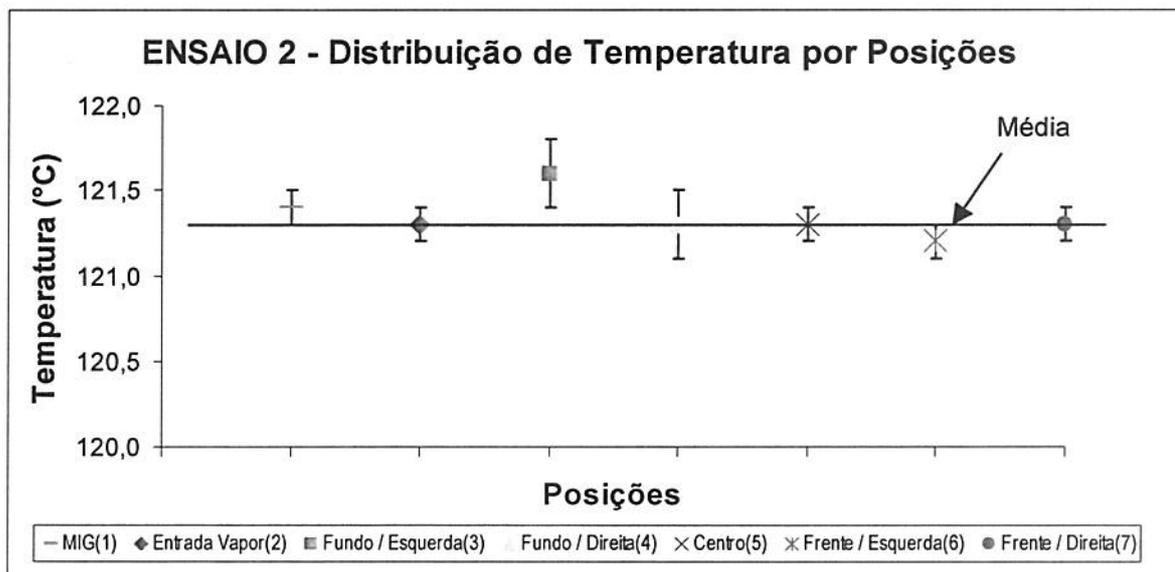


Figura 24 – Ensaio 2 de distribuição de temperaturas na décima bandeja do primeiro cesto

Na Tabela 7 pode-se verificar que a distribuição de temperaturas na região de estudo da autoclave está adequada, já que tanto a máxima diferença entre dois pontos, quanto a máxima diferença entre qualquer ponto e a temperatura de referência estão abaixo dos valores recomendados pelo NFPA.

Desta forma, a temperatura do meio de aquecimento pôde ser considerada constante em toda a região de estudo (décima bandeja do primeiro cesto) e aplicada como condição de contorno na resolução das equações diferenciais de transferência de calor do modelo.

5.2.3 Determinação do Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor

Para determinar o coeficiente convectivo de transferência de calor, foram realizados experimentos com embalagens contendo uma suspensão de bentonita 10%.

Inicialmente foram determinadas a difusividade térmica e a densidade da suspensão utilizada. As metodologias empregadas foram as mesmas utilizadas para as amostras de cubos de carne e matriz cárnea. Os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 10.

Tabela 10 – Difusividade e densidade da suspensão de bentonita 10% p/p.

	Difusividade (m^2/s)	Densidade (kg/m^3)
Média	1,86 E-07	1061,1
DP	0,13 E-07	4,4
CV (%)	7,23	0,4

O valor do calor específico considerado foi de 3931 J/kg (NIEKAMP et al., 1984). A partir destes três valores, a condutividade térmica foi calculada utilizando-se a Equação 4.4. O valor de condutividade encontrado foi de 0,777 W/m°C.

Para o cálculo de h , o processamento térmico foi dividido em quatro partes, sendo elas: início do *come up* (hh_1), correspondentes aos 11 primeiros minutos do processo, tempo de Ball, correspondentes a 42% CUT + aquecimento, (hh_2), início do resfriamento (hc_1), que correspondia ao 12 primeiros minutos do resfriamento e final do resfriamento (hc_2). Durante o resfriamento, a temperatura do meio caía rapidamente durante os 12 primeiros minutos. A pressão foi mantida para que as bolsas não estourassem, devido à alta temperatura interna. Por este motivo, o resfriamento também foi dividido em duas partes. Passado este tempo de resfriamento, a pressão é reduzida gradualmente até o fim do processo.

A partir de um valor inicial de $50 \text{ W/m}^2\text{°C}$, o programa calculava o perfil de temperatura em determinado ponto da embalagem, comparava este perfil calculado com aquele determinado experimentalmente e calculava o valor de Qui-quadrado (Equação 4.5). A seguir, o procedimento era repetido para um novo valor de h . O critério de parada era quando o valor de Qui-quadrado obtido não sofresse uma variação maior que 0,01 alterando-se o valor de h . Os valores obtidos para cada uma das fases encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores de h obtidos nas diferentes fases de processo

	$hh_1 \text{ (W/m}^2\text{°C)}$	$hh_2 \text{ (W/m}^2\text{°C)}$	$hc_1 \text{ (W/m}^2\text{°C)}$	$hc_2 \text{ (W/m}^2\text{°C)}$
Média (*)	828,7	538,5	1293,6	183,6
DP	413,7	196,3	797,2	39,4
CV (%)	49,9	36,5	61,6	21,5

(*) Obs.: Média de seis ensaios

Os altos valores do coeficiente de variação podem ter sido provocados pelo erro na determinação das coordenadas X, Y e Z, aleatórias para cada uma das seis embalagem processadas.

Na literatura, os valores verificados para o coeficiente de transferência de calor são bastante variados, encontrando-se valores desde 50 até 10000 W/m²°C. Desta forma, o valor de h deve ser determinado no sistema do qual se deseja construir o modelo de temperatura.

Durante o processamento térmico realizado em autoclaves utilizando-se vapor, Ramaswamy, Tung e Stark (1983) encontraram valores na faixa de 256 a 10000 W/m²°C, dependendo da proporção da mistura ar / vapor utilizada.

Cristianini (1998) avaliou o processamento térmico de atum em bolsas flexíveis em uma autoclave inundada com sobrepressão de ar. Para a determinação do valor do coeficiente convectivo de transferência de calor, o processamento térmico foi dividido em três partes: Fase de subida, aquecimento e resfriamento. O valor de h encontrado para cada trecho foi, respectivamente: 255,7, 307,7 e 50,6 W/m²°C.

Pinho (2003) determinou os valores do coeficiente convectivo de transferência de calor para um alimento infantil processado em potes de vidro em uma autoclave com processo inundado com sobrepressão de ar. O processamento térmico foi dividido em quatro partes e valor de h encontrado para cada trecho foi: 108,4 W/m²°C para o *come up*, 902,8 W/m²°C para o aquecimento, 992,1 W/m²°C para o início do resfriamento e 969,3 W/m²°C final do resfriamento.

5.2.4 Determinação do Ponto Frio da Embalagem

A finalidade do teste foi identificar a região onde o ponto frio da embalagem situava-se para que o modelo de cubos de carne imersos na matriz cárnea fosse construído, alocando-se um cubo de carne nesta região e espalhando-se os outros cubos aleatoriamente na embalagem.

A região encontrada situava-se deslocada em direção à base da embalagem, aproximadamente a 4,4cm do fundo da embalagem e 2,3cm de

altura, onde a embalagem é mais espessa, como pode ser observado na figura 25. Conhecida a localização do ponto frio, foi possível a cada teste alocar um cubo de carne especificamente nesta região, conforme descrito no item 4.3.2.

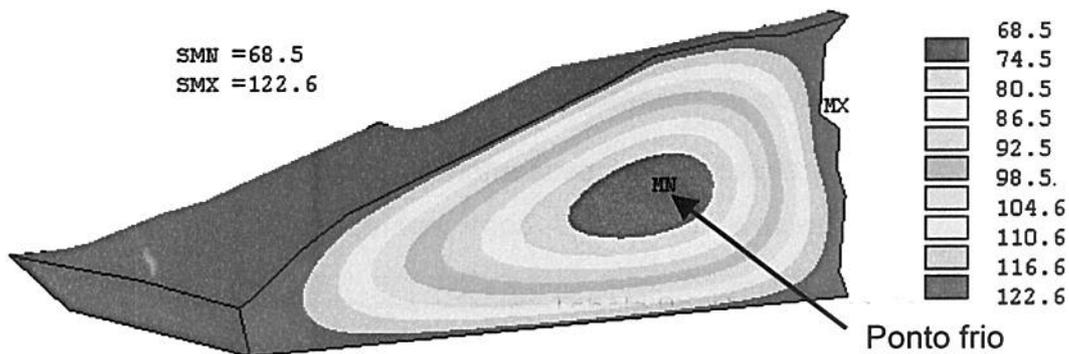


Figura 25 – Perfil de temperatura da embalagem contendo a matriz cárnea para a determinação da região do ponto frio

5.2.5 Determinação dos Parâmetros de Penetração de Calor

A finalidade da realização do ensaio de penetração de calor foi determinar o mecanismo pelo qual o produto é aquecido, bem como verificar a existência de mudanças nas propriedades térmicas do mesmo durante o aquecimento, o que provocaria a obtenção de uma curva quebrada.

A Tabela 12 apresenta os valores de taxa de aquecimento (f_h), taxa de resfriamento (f_c), fator de atraso de aquecimento (j_h) e fator de atraso de resfriamento (j_c), determinados para o produto.

Tabela 12 – Resultados obtidos na determinação dos parâmetros de penetração de calor

POSIÇÃO	ENSAIO 1				ENSAIO 2			
	f_h (min)	j_h	f_c (min)	j_c	f_h (min)	j_h	f_c (min)	j_c
Fundo / Esquerda	32,1	3,25	38,7	2,07	31,8	3,21	36,2	2,25
Fundo / Centro	31,9	3,17	39,2	2,04	30,8	3,07	36,0	2,25
Fundo / Direita	32,1	2,89	38,9	2,06	32,1	3,03	37,1	2,19
Média	32,0	3,10	38,9	2,06	31,6	3,10	36,4	2,23
DP	0,1	0,19	0,3	0,02	0,7	0,09	0,6	0,03
CV (%)	0,2	6,2	0,6	0,7	2,2	3,0	1,6	1,6

Os valores de f_h médio encontrados nos dois processos, entre 31,6min. e 32,0 min., indicam que o alimento é aquecido por condução (TOWNSEND et al., 1949). Conforme pode ser verificado na Figura 25, a curva de penetração de calor obtida não apresenta ponto de quebra, demonstrando que não ocorrem grandes mudanças nas propriedades térmicas do alimento durante o processamento, validando a proposição inicial deste trabalho em considerar os valores para as propriedades térmicas constantes.

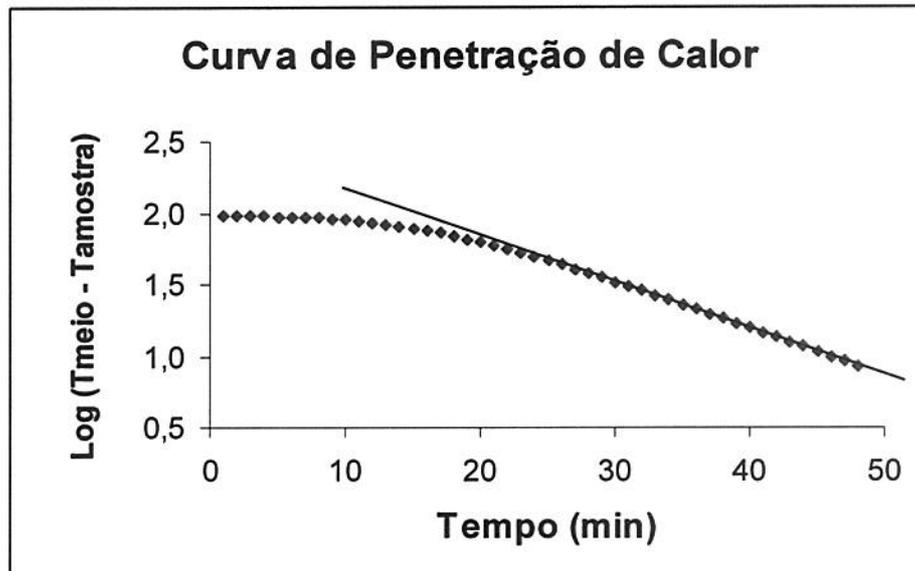


Figura 25 – Curva característica de ensaio de penetração de calor no produto

Ravi Shankar, Srinivasa Gopal e Vijayan (2002) estudaram o processamento térmico e estocagem de peixe em bolsas flexíveis de 17,0cm x 15,5cm com 210g do material. O valor de f_h encontrado foi de 25min. e o j_h de 0,47.

Ansar Ali, Sudhir e Srinivasa Gopal (2006) verificaram o efeito a rotação de uma autoclave rotativa no valor de f_h e j_h de atum em óleo em bolsas flexíveis de 17cm x 20cm contendo 240g de material. Para o processamento estático, o valor de f_h encontrado foi de 27,8min. e o j_h de 1,02.

Mohan et al. (2006) determinaram o valor de f_h e j_h de camarão em bolsas flexíveis de 160 mm x 200 mm com 196g de material. O valor encontrado para o f_h foi de 19,0min. e o j_h foi de 0,96. Quando a mesma quantidade de produto foi processada em latas de alumínio de 77 mm x 60 mm, o valor de f_h subiu para 32min. e o valor de j_h para 1,44.

O valor de f_h encontrado neste trabalho foi consideravelmente maior devido à embalagem utilizada ser menor que as relatadas acima (12,0cm x 17,8cm) com

maior quantidade de produto (350g), resultando em embalagens com aproximadamente 5,0cm no parte mais espessa.

5.2.6 Determinação dos Parâmetros D e z

O parâmetro D do *Clostridium sporogenes* em cubos de carne manufacturados e em matriz cárnea foi determinado em cada uma das seguintes temperaturas: 110°C, 115°C e 118°C.

Inicialmente foi realizada a determinação do valor do atraso térmico dos tubos, ou seja, foi verificado em quanto tempo após ter sido colocado no banho, a temperatura no centro do tubo atingia a temperatura do banho. Esta determinação foi feita em triplicata para cada uma das temperaturas e o valor médio encontrado foi de 3 minutos.

A Tabela 13 apresenta os valores de D para os cubos e mistura de carne nas temperaturas de 110, 115 e 118°C.

Tabela 13 – Resultados obtidos no teste TDT

		110°C	115°C	118°C
Cubo de carne manufaturado	D (min)	20,33	9,45	6,29
	R ²	0,9791	0,9914	0,9942
Matriz Cárnea	D ₂ (min)	20,70	9,76	6,07
	R ²	0,9811	0,9533	0,9541

As curvas obtidas nos ensaios de determinação dos valores de D a 110, 115 e 118°C do *Clostridium sporogenes* para os cubos de carne e matriz cárnea podem ser observadas nas Figuras 26 a 31.

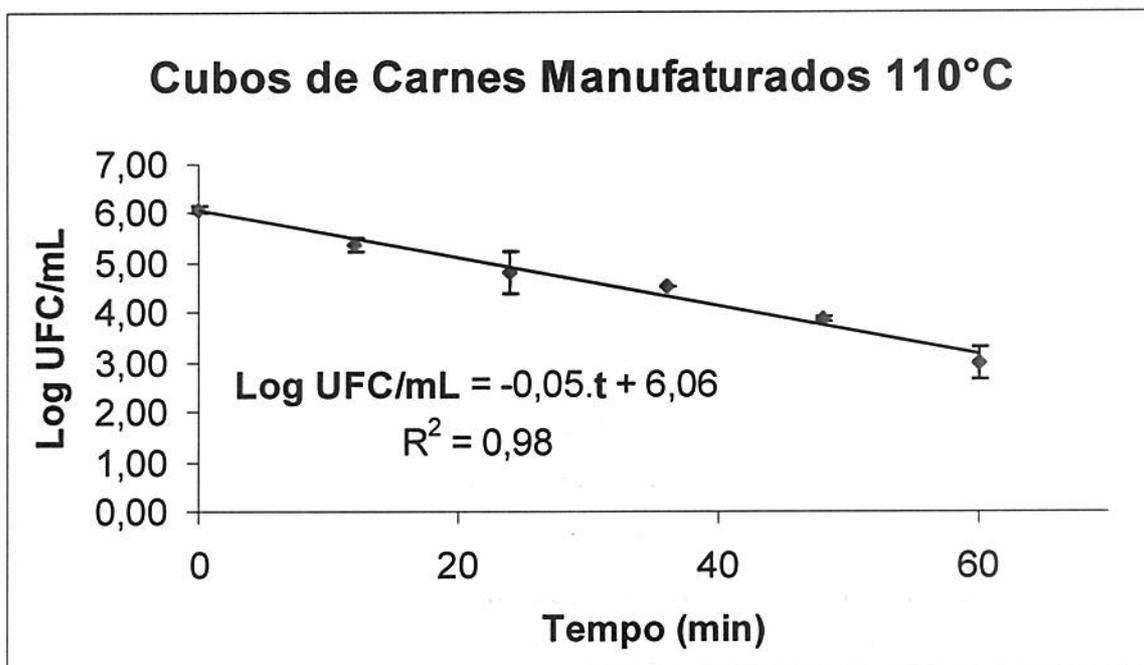


Figura 26 – Curva de sobreviventes do *Clostridium sporogenes* a 110°C em cubos de carne manufaturados

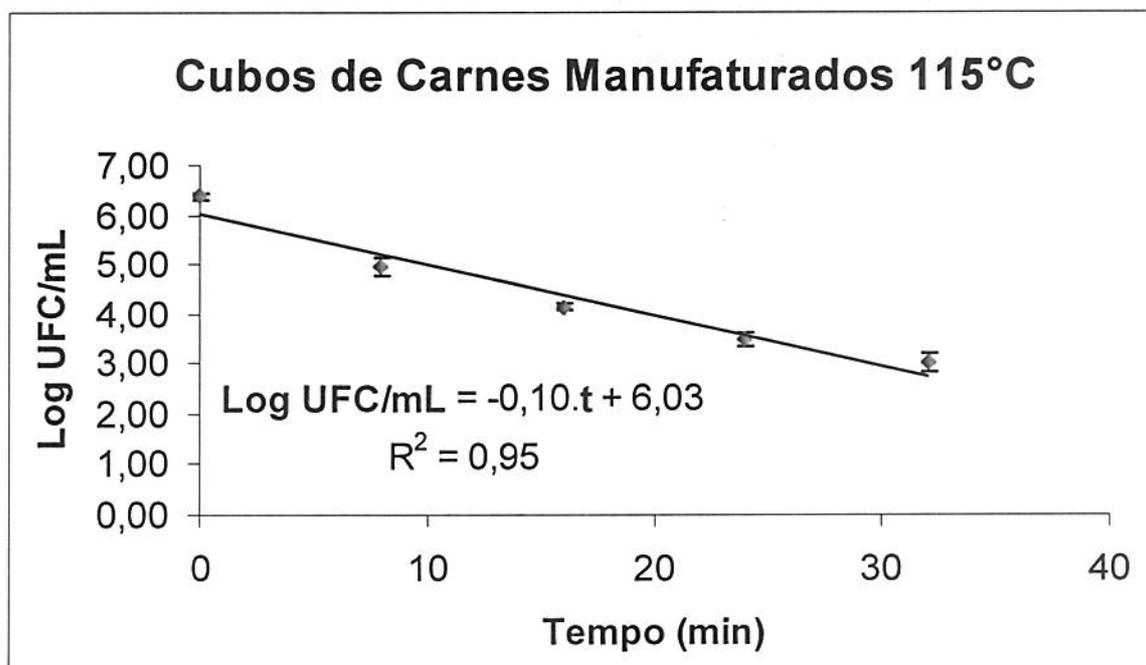


Figura 27 – Curva de sobreviventes do *Clostridium sporogenes* a 115°C em cubos de carne manufaturados

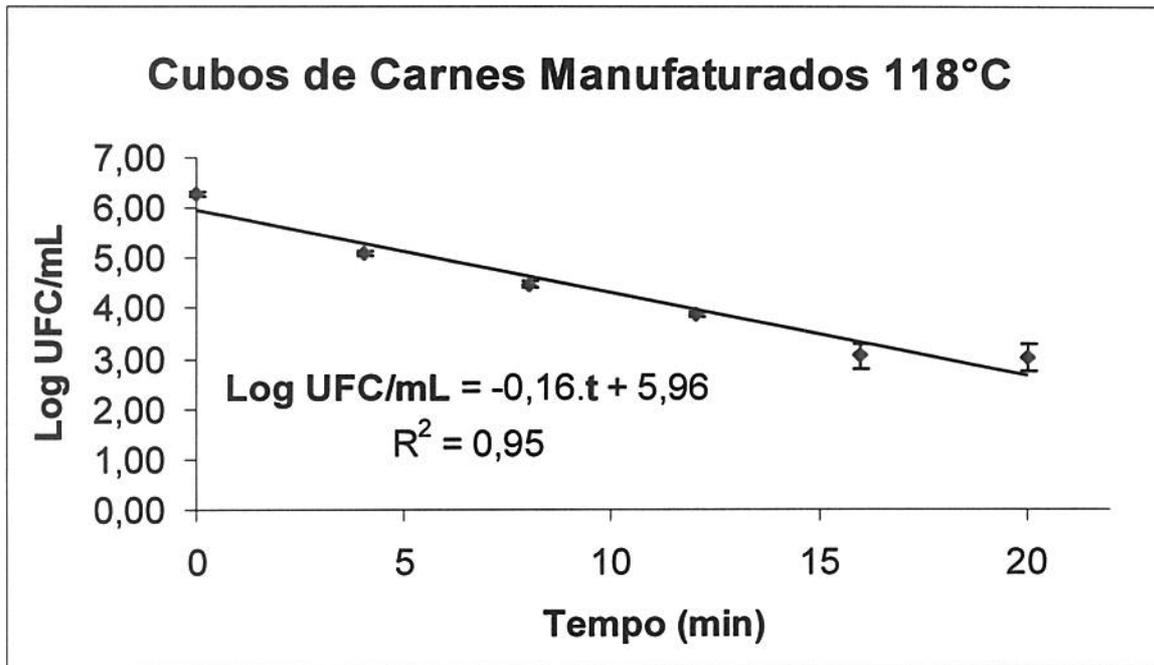


Figura 28 – Curva de sobreviventes do *Clostridium sporogenes* a 118°C em cubos de carne manufaturados

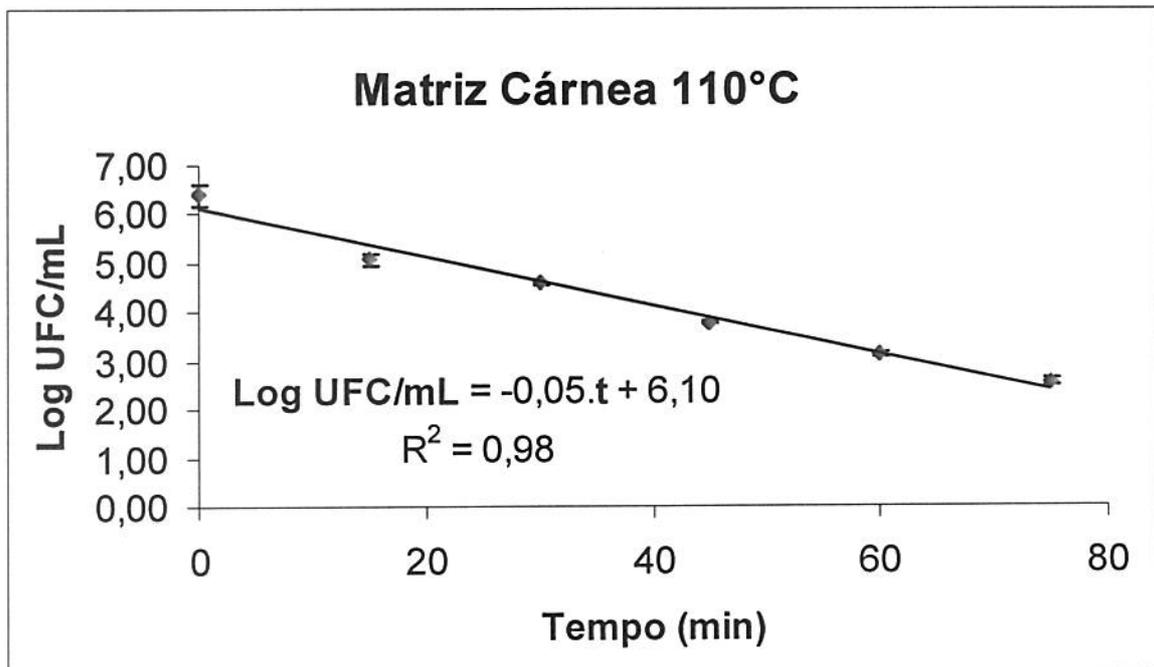


Figura 29 – Curva de sobreviventes do *Clostridium sporogenes* a 110°C em matriz cárnica

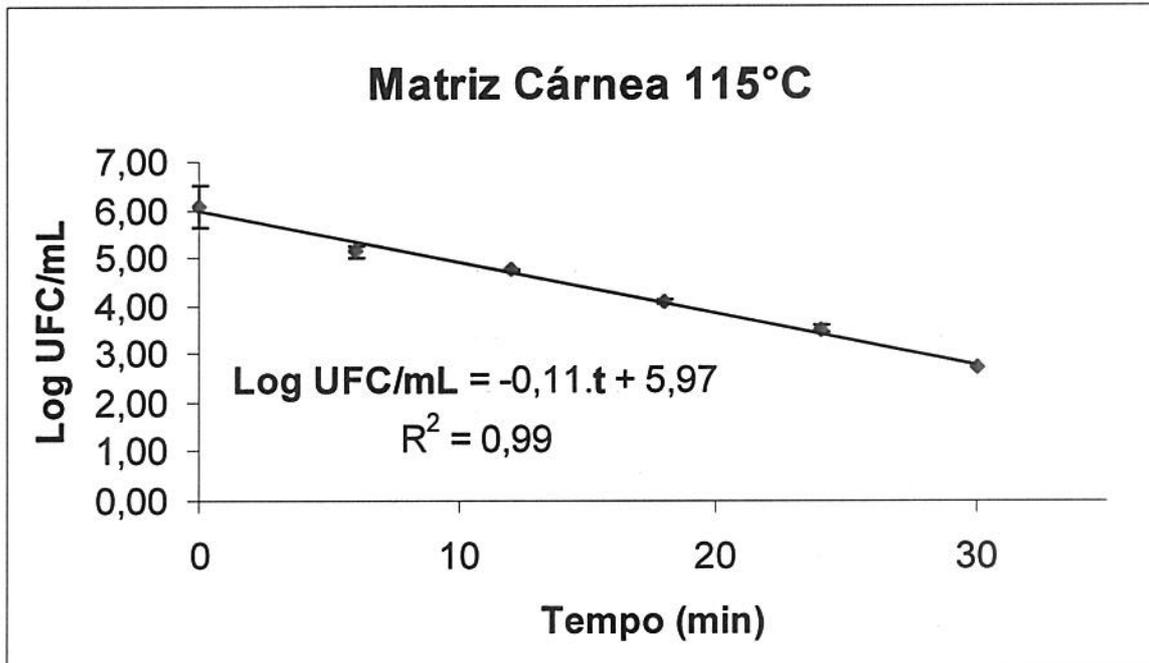


Figura 30 – Curva de sobreviventes do *Clostridium sporogenes* a 115°C em matriz cárneia

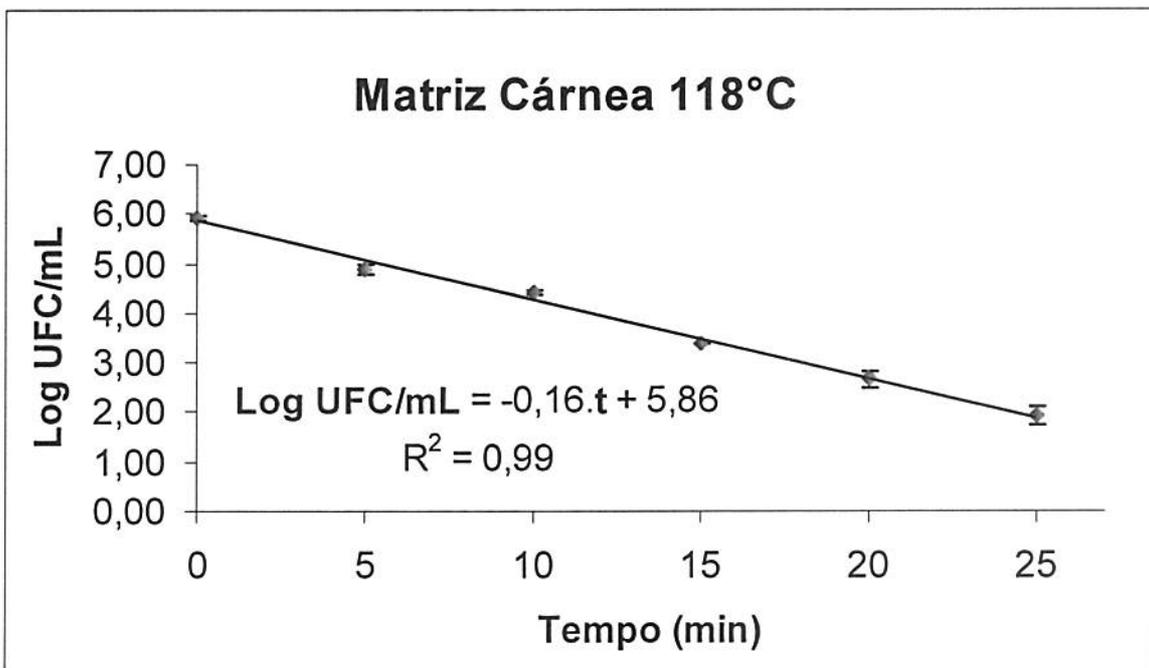


Figura 31 – Curva de sobreviventes do *Clostridium sporogenes* a 118°C em matriz cárneia

Como pode ser observado nas figuras 26 a 31 e assim como ocorreu com os estudos de Stumbo, Murphy e Cochran (1950), todas as curvas de tempo de morte térmica obtidas foram linhas retas. A partir dos valores de D obtidos para os cubos de carne e matriz cárnea, foi realizada a regressão linear dos valores de D e das temperaturas para determinação dos valores de z, como pode ser observado nas figuras 32 e 33.

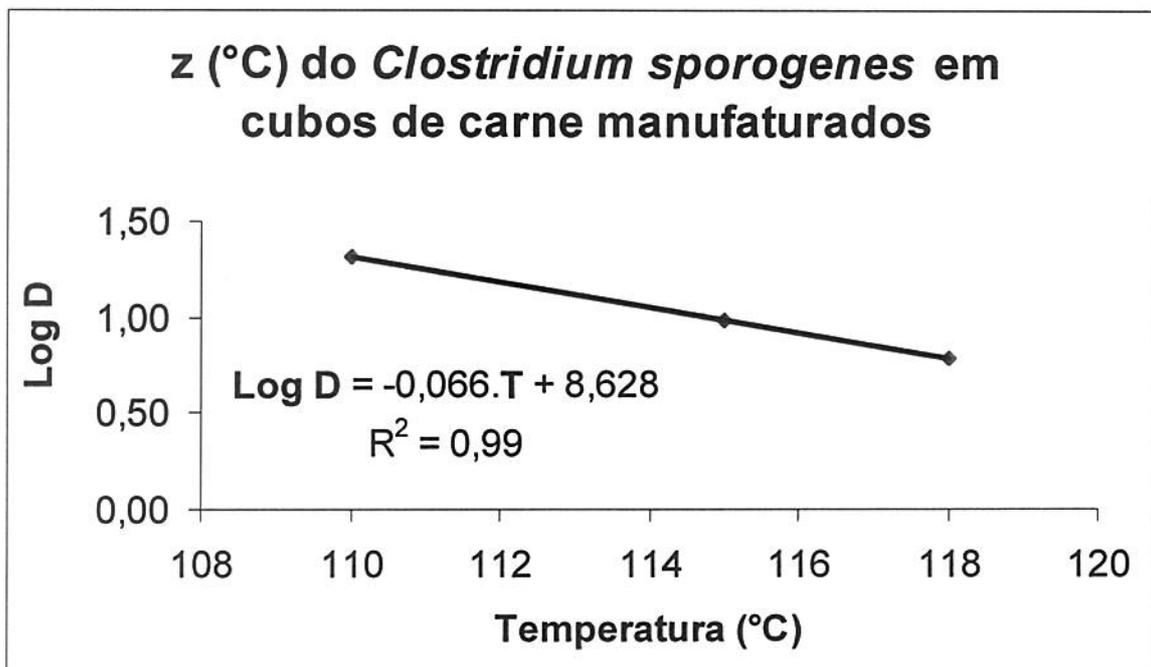


Figura 32 – Curva Fantasma da Destruição Térmica de *Clostridium sporogenes* em cubos de carne manufaturados

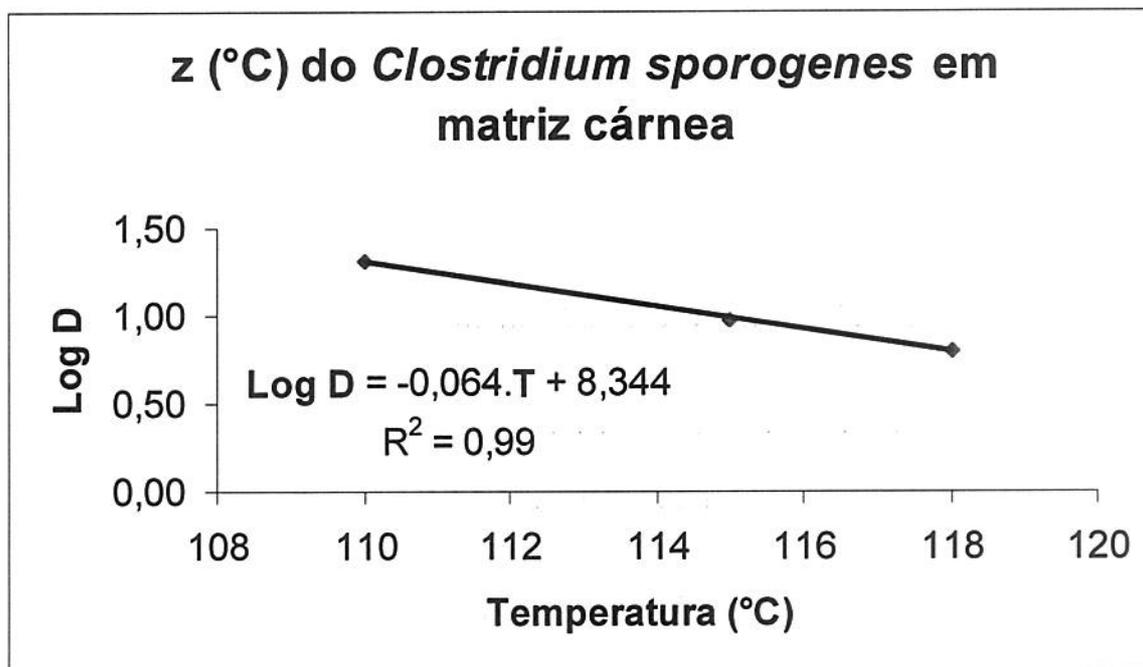


Figura 33 – Curva Fantasma da Destruição Térmica de *Clostridium sporogenes* em matriz cárnea

O valor de z encontrado para os cubos de carne foi de 15,04°C e para a matriz cárnea foi de 15,63°C, mostrando que os valores parecem não variar com o produto na faixa de umidade estudada.

Na literatura, os valores encontrados para os parâmetros de destruição térmica do *Clostridium sporogenes* são bastante variados. Stumbo (1973) cita $D_{121^\circ\text{C}}$ entre 0,1 e 1,5 minutos e z entre 7,8 e 10,0°C.

Brown et al. (1984), ao determinarem a resistência térmica de *Clostridium sporogenes* em uma mistura de carne com alginato encontram $D_{121^\circ\text{C}} = 0,8\text{min}$ e valor de z de 12,7°C na faixa de temperatura de 115 a 130°C.

Senger et al. (1989) ao avaliar o processo de esterilização para embalagens assépticas encontraram D do *Clostridium sporogenes* em cubos de peru ao molho igual a 9,2, 4,6, 2,1 e 0,91 minutos a 113, 116, 118 e 121,1°C e z de 8,5°C. O pH do produto era de aproximadamente 6,8.

Stumbo, Murphy e Cochran (1950) reportaram D igual a 58,6, 17,7, 4,64, 1,21 e 0,32 minutos para *Clostridium sporogenes* a 104,4, 110,0, 115,6, 121,1 e 126,7°C para carne de porco cozida. O valor de z reportado neste trabalho foi de 9,7°C.

Cameron, Leonard e Barrett (1980) determinaram D e z de *Clostridium sporogenes* em purê de ervilha e tampão fosfato com pH variando de 5,0 a 7,0. Ao determinar os valores de D e z em purê de ervilha com pH 7,0 encontrou valores de D iguais a 25,3, 15,0, 8,9, 5,2 e 3,1 minutos a 110, 112,8, 115,6, 118,3 e 121°C, respectivamente e z de 12,2°C. Os autores concluíram que valores mais baixo de pH foram mais destrutivos aos esporos em temperaturas mais altas.

Ocio et al. (1994) ao determinarem a resistência térmica de esporos do *Clostridium sporogenes* em tampão fosfato, encontraram D de 12,78, 5,2, 3,29 e 0,95 minutos a 110, 115, 118 e 121°C, respectivamente, com z igual a 10,26°C. Já em extrato de cogumelo, com pH 6,7, os valores foram de 8,47, 1,74, 1,22 e 0,67 minutos às mesmas temperaturas. O valor de z encontrado foi de 10,16°C.

Goldoni et al. (2001) ao determinar a termorresistência de *Clostridium sporogenes* em purê de cenoura com pH de 5,3 encontrou D de 4,44, 2,46 e 1,11 minutos a temperaturas de 115, 118 e 121°C respectivamente. Os autores ainda comentam sobre outros trabalhos publicados onde se verifica que um aumento da acidez do meio geralmente é acompanhado de um decréscimo da resistência térmica do PA 3679, e que o efeito do pH é mais pronunciado nas temperaturas de processamento mais elevadas do que nas mais baixas.

Desta forma, verifica-se que os valores de D e z encontrados neste trabalho para cubos de carne manufaturados e matriz cárnea estão na faixa daqueles citados pela literatura para produtos com valores de pH próximos à neutralidade.

5.3 Modelamento Matemático do Perfil de Temperatura no Interior da Embalagem

Para validar experimentalmente o modelo de temperatura elaborado foram realizados seis experimentos.

O modelo matemático tridimensional e axissimétrico do processamento térmico considerava como dados de entrada: o perfil real de temperatura da autoclave durante os processamentos, a temperatura inicial da amostra e as propriedades térmicas (condutividade, calor específico e densidade) das amostras de cubos de carne manufaturados e matriz cárnea.

5.3.1 Validação do Modelo de Temperatura

Considerando-se os resultados obtidos pelo modelo gerado a partir da malha de 2874 elementos, foi realizada uma avaliação dos parâmetros estatísticos considerando-se os dados obtidos nos seis ensaios de validação do modelo de temperatura realizados.

A Tabela 14 apresenta o valor de Qui-quadrado (Q^2) resultado da comparação de quatro curvas de temperaturas obtidas experimentalmente e através da simulação (324 leituras de temperatura). A Figura 34 apresenta um exemplo dos perfis de temperaturas obtidos em um dos ensaios de validação do modelo.

Tabela 14 – Parâmetros estatísticos obtidos na regressão linear dos valores de temperaturas experimentais contra aqueles estimados pelo modelo

R^2	Inclinação	Q^2
0,9965	0,9907	15,56

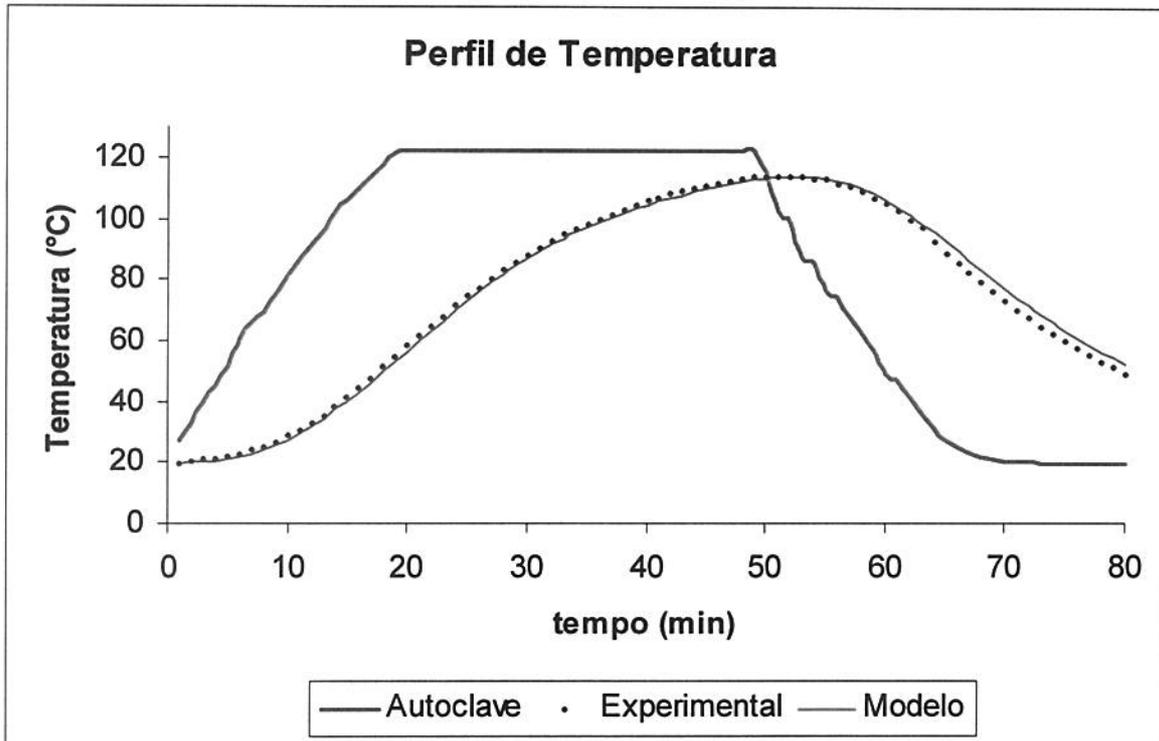


Figura 34 – Exemplo de perfis de temperaturas (modelo e experimental)

Pelo que pode ser observado na Tabela 14 o modelo de temperatura gerado apresenta altos valores de correlação com os valores obtidos experimentalmente, já que o valor de R-quadrado é superior a 0,99 e o valor da inclinação também superior a 0,99. Esses valores demonstram que a aleatoriedade da posição dos cubos de carne parecem não ter um efeito significativo na temperatura obtida pelo modelo. Além disso, conforme pode ser observado na Figura 34, as maiores diferenças entre valores de temperatura previstos e valores obtidos experimentalmente encontram-se no início da fase de aquecimento (abaixo de 80°C) e final da fase de resfriamento, onde o valor da letalidade é desprezível.

Nicolai et al. (1995) elaboraram e validaram experimentalmente um modelo matemático utilizando a técnica de elementos finitos capaz de estimar a distribuição de temperatura durante o processamento térmico de lasanha. Os

autores verificaram diferenças inferiores a 3°C entre os valores de temperaturas calculados e os obtidos experimentalmente.

Cristianini (1998) elaborou um modelo matemático tridimensional utilizando a técnica de elementos finitos para avaliar a distribuição de temperaturas durante o processo de esterilização de atum em bolsa flexível. Os valores dos parâmetros estatísticos, R-quadrado e inclinação, foram de 0,9998 e 0,9979, e 0,9995 e 0,9867, para as fases de aquecimento e resfriamento, respectivamente.

As Figuras 35 a 38 representam os perfis de temperatura no interior da embalagem durante o processamento das amostras do produto.

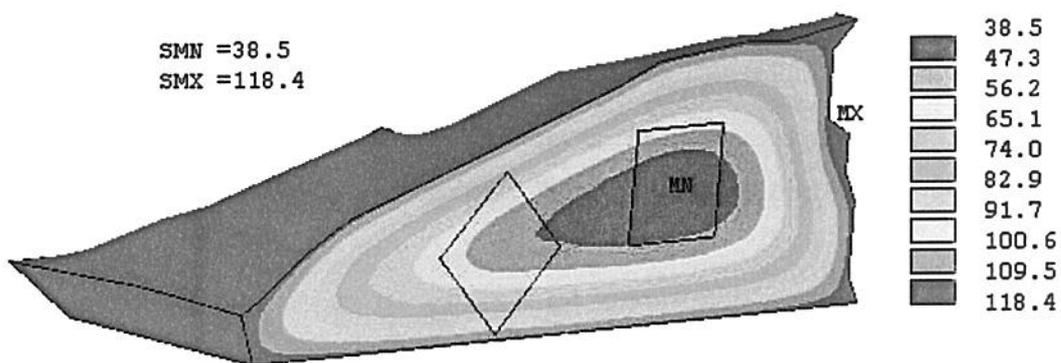


Figura 35 – Perfil de temperatura no interior da embalagem no final do *come up* (após 18 min de processo)

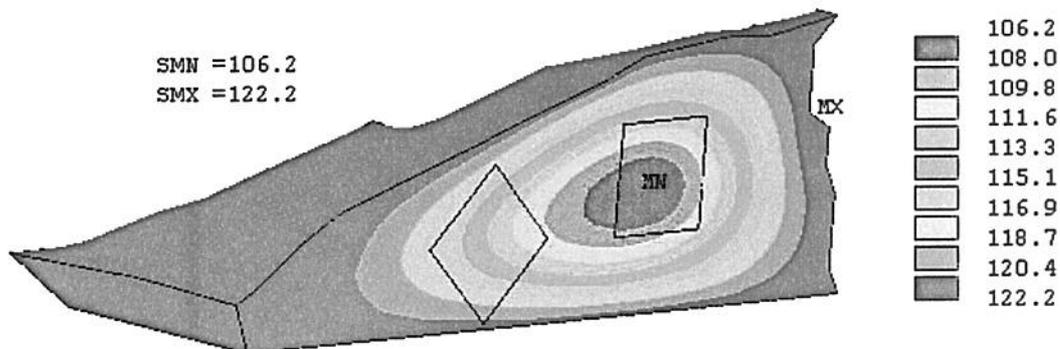


Figura 36 – Perfil de temperatura no interior da embalagem no final do aquecimento (após 49 min de processo)

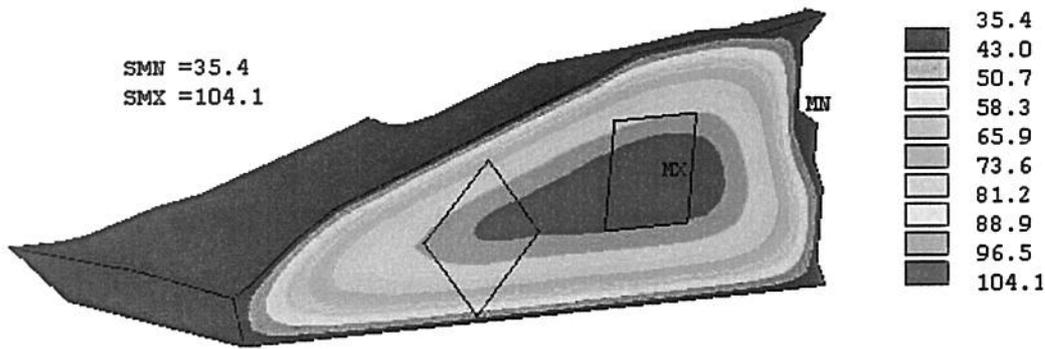


Figura 37 – Perfil de temperatura no interior da embalagem após 12 minutos de resfriamento (61 min de processo)

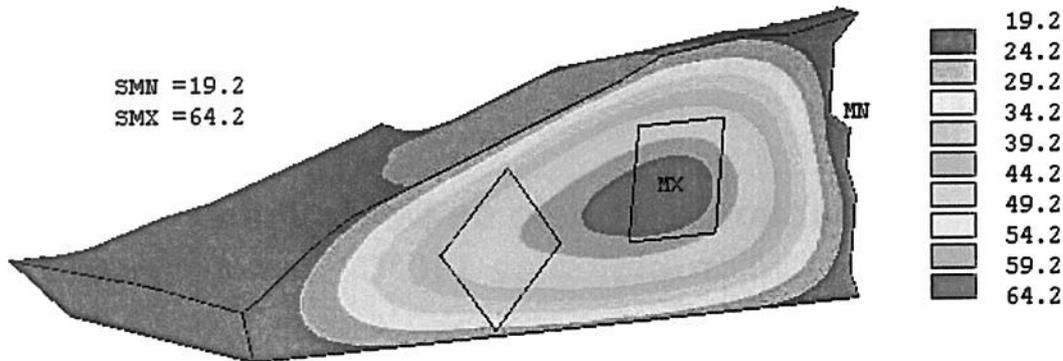


Figura 38 – Perfil de temperatura no interior da embalagem ao final do processo (80 minutos)

Conforme pode ser verificado nas Figuras 35 a 38, o ponto frio para este perfil de embalagem está deslocado para a base do produto, onde a espessura da embalagem é maior. Essa verificação é importante, pois para embalagens flexíveis tipo travesseiro, o ponto frio está localizado geralmente no centro geométrico do produto, o que não ocorre para embalagens tipo *stand up pouch*. É de extrema importância a verificação do ponto frio para este tipo de embalagem para a determinação de parâmetros de aquecimento e resfriamento f_h , j_h , f_c e j_c e para garantir a segurança do produto. Geralmente o ponto frio para este tipo de embalagem é determinado experimentalmente, o que demanda muito tempo experimental.

5.3.2 Validação do Modelo de Destruição Microbiológica

Foi realizado um ensaio com cinco amostras em cada uma das temperaturas testadas, 110°C e 115°C. O F_m experimental de cada amostra foi calculado multiplicando-se o número de reduções decimais verificadas através das contagens pelo valor $D_{121^\circ\text{C}}$ encontrado no teste TDT. Foi comparado o F_m experimental de cada amostra com o valor previsto pelo modelo através da Equação 5.4.

$$\text{Desvio}_{EXP \times MOD} = ((F_{mEXP} - F_{mMODELO}) / F_{mMODELO}) * 100 \quad (5.4)$$

As Figuras 39 e 40 apresentam perfis de temperaturas obtidas durante os experimentos para a validação do modelo de destruição microbiológica a 110 e 115°C, respectivamente.

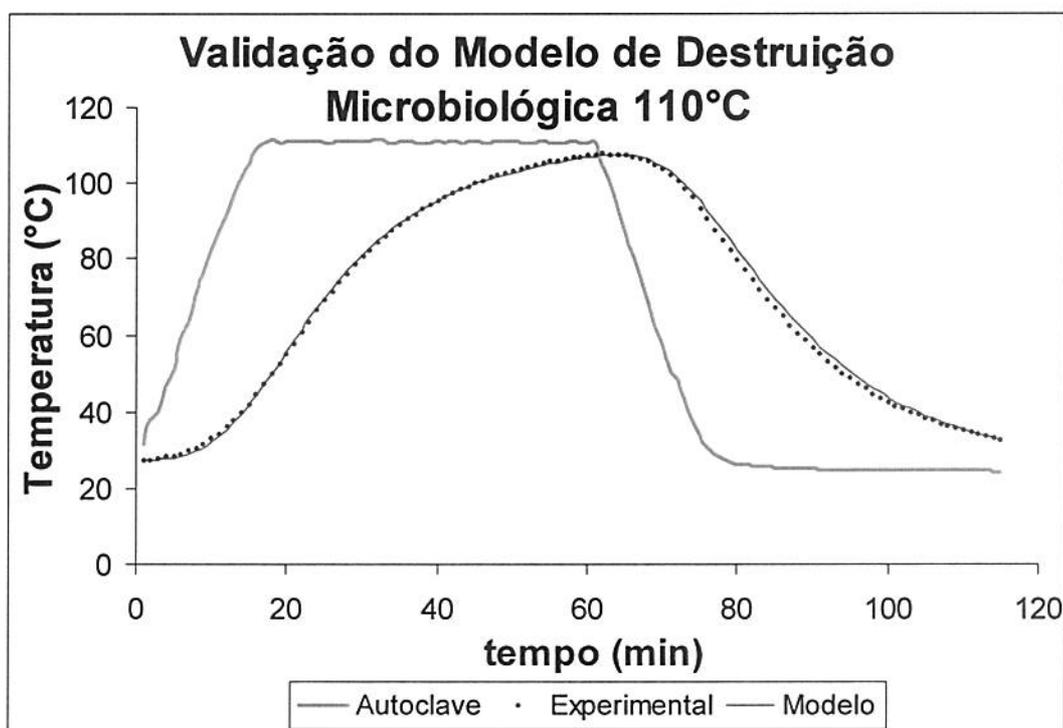


Figura 39 – Perfil de temperaturas durante o processo para a validação do modelo de destruição microbiológica a 110°C

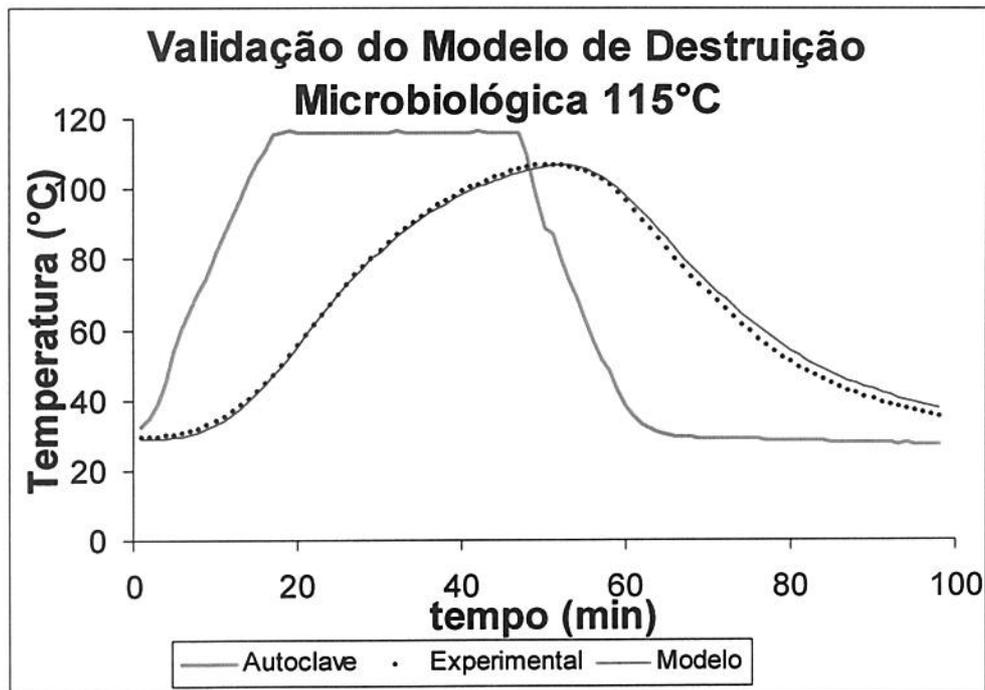


Figura 40 – Perfil de temperaturas durante o processo para a validação do modelo de destruição microbiana a 115°C

As Figuras 41 e 42 apresentam os gráficos da distribuição do valor de esterilização média da massa (EMM) ao longo do tempo nos processos para a validação do modelo de destruição microbiana a 110 e 115°C, respectivamente.

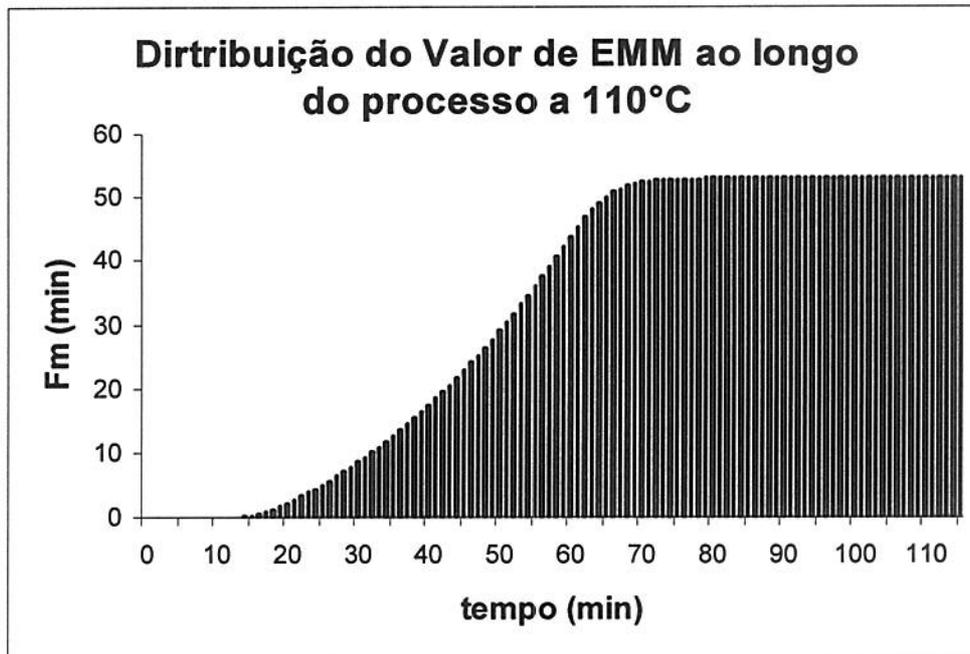


Figura 41 – Distribuição do Valor de Esterilização Média da Massa ao longo do processo de validação do modelo de destruição microbiológica a 110°C

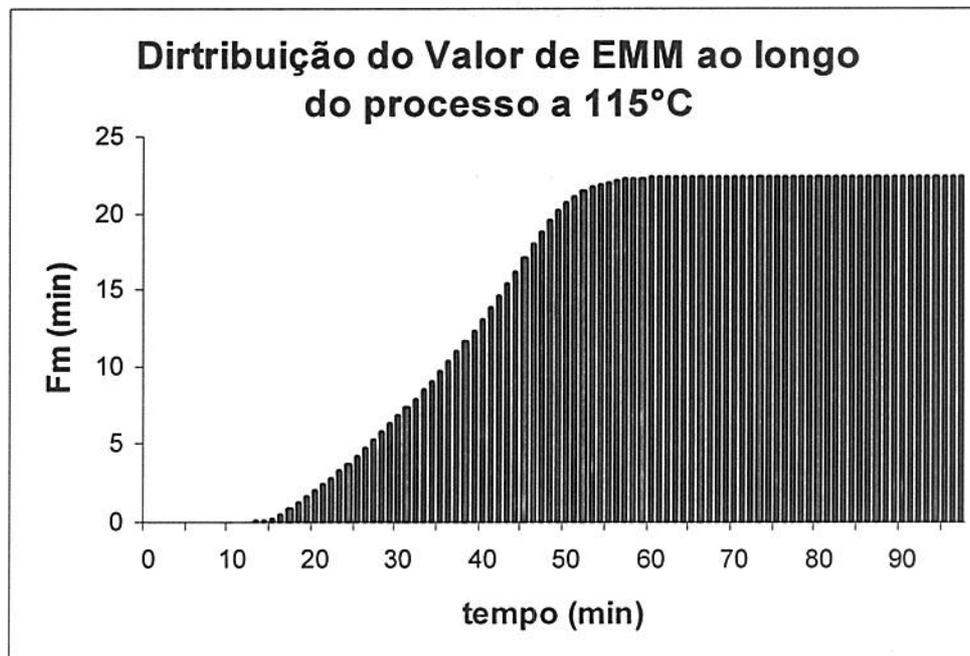


Figura 42 – Distribuição do Valor de Esterilização Média da Massa ao longo do processo de validação do modelo de destruição microbiológica a 110°C

Um resumo dos resultados obtidos nos ensaios de validação do modelo de destruição microbiológica a 110 e 115°C pode ser verificado nas Tabelas 15 e 16, respectivamente.

Tabela 15 – Resultados obtidos nos ensaios de validação microbiológica do modelo a 110°C

110 °C	Embalagem				
	1	2	3	4	5
F_m Modelo (min)	53,03				
F_m Exp. (min)	60,23	60,39	66,12	50,91	52,49
Desvio F_m Exp x F_m Modelo (%)	13,6	13,9	24,7	-4,0	-1,0

Obs. Média dos desvios = 9,4%

Tabela 16 – Resultados obtidos nos ensaios de validação microbiológica do modelo a 115°C

115 °C	Embalagem				
	1	2	3	4	5
F_m Modelo (min)	22,41				
F_m Exp. (min)	24,67	23,48	24,36	24,88	23,41
Desvio F_m Exp x F_m Modelo (%)	10,1	4,8	8,7	11,0	4,5

Obs. Média dos desvios = 7,8%

Pelo que pode ser observado nas Tabelas 15 e 16 o modelo matemático de destruição microbiológica construído é capaz de prever de maneira satisfatória a destruição térmica de microrganismos. A 110°C a média dos desvios percentuais entre os valores de F_m obtidos experimentalmente e o previsto pelo modelo foi de 9,4%. A 115°C a média dos desvios foi de 7,8%. Apesar dos maiores desvios para o teste a 110°C, desvios inferiores a 10,0% podem ser considerados bastante satisfatórios em função de todos os erros que estão envolvidos em análises microbiológicas.

Camargo (1995), ao utilizar *Bacillus stearotherophilus* como indicador biológico do processo de esterilização de purê de cenoura, encontrou desvios inferiores a 15% em ensaios realizados a 121°C e inferiores a 30% naqueles realizados a 115°C.

Pinho (2003) utilizou *Bacillus stearotherophilus* para validar um modelo matemático para predição de processamento de um alimento infantil em pote de vidro. Os dados obtidos experimentalmente pela autora foram sempre inferiores a 12% em processamento realizado a 110°C e naqueles realizados a 115°C esta diferença foi sempre inferior a 27%.

Além da comparação entre os valores de F_m experimental e aqueles previstos pelo modelo, foi realizada uma comparação entre os valores de F_p (letalidade acumulada até o final da fase de aquecimento) previstos pelo modelo e aqueles calculados a partir das temperaturas medidas pelo termopar posicionado no ponto frio da amostra. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 – Comparação entre valores de F_p obtidos nos ensaios de validação microbiológica do modelo a 110°C

110 °C	Processo	
	110	115
F_p Modelo (min)	14,16	3,93
F_p Exp. (min)	13,01	4,21
Desvio F_p Exp x F_p Modelo (%)	-8,1	7,1

Os valores obtidos para a variação podem ser explicados pela falta de ajuste do modelo e por variações nas leituras dos termopares. Pflug (1975 apud CAMARGO, 1995) cita que variações desta natureza podem ser esperadas, já que as leituras fornecidas pelos termopares podem ser prejudicadas pela entrada de água por entre a capa de isolamento dos fios de extensão dos termopares.

Porém, conforme ocorreu com o valor de esterilidade média da massa, desvios entre os valores experimentais e os valores obtidos pelo modelo matemático inferiores a 10% podem ser considerados bastante satisfatórios, pois além dos erros de análises microbiológicas, no caso da determinação de F_p ainda há o erro gerado pela aleatoriedade da posição do cubos de carne no interior da amostra.

Esses resultados vêm demonstrar quão eficiente é o Método dos Elementos Finitos na predição de temperatura de alimentos cárneos particulados, imersos em uma matriz cárnea de propriedades térmicas distintas, processadas em embalagens com alto grau de desuniformidade.

6 CONCLUSÕES

Pelos resultados apresentados neste trabalho foi possível concluir que:

- Os dois produtos estudados, cubos de carne manufaturados e matriz cárnea, apresentaram propriedades térmicas distintas. A condutividade térmica e a difusividade térmica dos dois produtos estavam altamente correlacionadas com a umidade, de acordo com fórmulas empíricas determinadas para alimentos de origem e composição centesimal semelhantes.
- a distribuição de temperatura na décima bandeja do primeiro cesto da autoclave estudada apresentou resultados que estão de acordo com as normas do NFPA. Desta forma, as amostras dos ensaios de validação do modelo matemático elaborado puderam ser posicionadas em toda a região da bandeja, sendo que a temperatura média de dois termopares posicionados na região próxima às embalagens foi considerada como condição de contorno do modelo.
- Os modelos matemáticos gerados considerando-se os valores do coeficiente convectivo de transferência de calor obtidos a partir da divisão do processamento térmico em quatro fases (*come up*, tempo de Ball, início de resfriamento e final de resfriamento), demonstrou resultados satisfatórios.
- a análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios de validação do modelo matemático tridimensional construído utilizando-se a técnica de elementos finitos mostrou que o mesmo é capaz de prever de maneira satisfatória a distribuição de temperaturas de um alimento particulado condutivo de propriedades térmicas distintas, sendo bastante útil para o desenvolvimento e otimização de novos produtos e novos processos em embalagens com alto grau de desuniformidade.

- Os valores de D e z para o *Clostridium sporogenes* em cubos de carne manufaturados e em matriz cárnea, determinados neste trabalho, estão de acordo com valores encontrados na literatura para alimentos com pH na faixa da neutralidade. Os valores parecem não ser influenciados pela diferença de umidade dos dois produtos.
- os resultados dos testes de validação do modelo de destruição microbiológica demonstraram que este é capaz de prever de maneira satisfatória a destruição de *Clostridium sporogenes* em cubos de carne manufaturados em uma matriz cárnea. Nos ensaios a 110°C o valor médio do desvio entre o valor previsto pelo modelo matemático e valores obtidos experimentalmente foi de 9,4%. Nos ensaios realizados a 115°C o valor médio do desvio foi de 7,8%.
- A aleatoriedade da posição dos cubos de carne na matriz cárnea parece não alterar de forma significativa a predição da distribuição de temperatura no interior da embalagem, obtida através do modelo matemático gerado pelo software, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos.
- Para futuros estudos, uma sugestão seria realizar a análise de processamento térmico de alimento com características convectivas em embalagens de formatos irregulares utilizando o MEF.
- Outra sugestão seria a avaliação de alimentos particulados em meio convectivo utilizando o MEF, com validação experimental do modelo de destruição de microrganismos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDUL GHANI, A. G.; FARID, M. M. A Numerical Simulation Study on Thermal Sterilization of Food in Pouches using Computational Fluid Dynamics (CFD). **Association for Computing Machinery New Zealand Bulletin**, n.1 (2), 2005

ALCAN Packaging. **Petfood Industry**, Mt. Morris, IL, USA, v. 46 n. 1, p.32, jan. 2004.

ANDRADE, C.R.; ZAPAROLI, E.L. Condução de calor bidimensional com condutividade térmica dependente da temperatura. **VIII Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA**, São José dos Campos, out. 2002. Disponível em <www.bibl.ita.br/viiiencita/Conducao%20de%20calor%20bidimensional%20com%20condutividade%20termica%20dependente%20da%20temperatura.pdf>. Acesso em 28 dez. 2006.

ANSAR ALI, A.; SUDHIR, B.; SRINIVASA GOPAL, T. K. Effect of Rotation on the Heat Penetration Characteristics of Thermally Processed Tuna in Oil in Retort Pouches. **International Journal of Food Science and Technology**. v. 41, p. 215–219, 2006

ANSYS Theory Reference. 9ed. SAS IP, Inc. CD-ROM.

BAGHE-KHANDAN, M. S.; OKOS, M. R.; SWEAT, V. E. The Thermal Conductivity of Beef as Affected by Temperature and Composition. **Transactions of the ASAE**, p. 1118-1122, 1982.

BANGA, J. R.; PEREZ-MARTIN, R. I.; GALLARDO, J. M.; CASARES, J. J. Optimization of the thermal processing of conduction-heated canned foods: study of several objective functions. **Journal of Food Engineering**. v. 14, n. 1, p. 25-51, 1991.

BHOWMIK, S. R.; SHIN, S. Thermal Sterilization of Conduction-Heated Foods in Plastic Cylindrical Cans Using Convective Boundary Condition. **Journal of Food Science**. v. 56, n. 3, p. 827-830, 1991.

BRASIL. Ministério da Agricultura do Abastecimento e da Reforma Agrária. Secretaria de Defesa Agropecuária. Departamento de Defesa Animal. **Manual de métodos microbiológicas para alimentos**. Coordenação Geral de Laboratório Animal. 1991/1992 2ª revisão. 136p.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n.09, de 9 de julho de 2003. Aprova o Regulamento Técnico Sobre Fixação de Padrões de Identidade e Qualidade de Alimentos Completos e de Alimentos

Especiais Destinados a Cães e Gatos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 jul. 2003. Seção 1, n. 133, p. 7-8.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n.62, de 26 de agosto de 2003. Oficializa os Métodos Analíticos Oficiais para Análises Microbiológicas para Controle de Produtos de Origem Animal e Água. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 set. 2003. Seção 1, n. 181, p. 14-51.

BRAZIL becoming big exporter. **Petfood Industry**, Mt. Morris, IL, USA, v. 46 n. 10, p.39, out. 2004.

BROWN, K.L.; AYRES, C.A.; GAZE, J.E.; NEWMAN, M.E. Thermal Destruction of Bacterial Spores Immobilized in Food/Alginate Particles. **Food Microbiology**. v. 1, p. 187-198, 1984.

CAMARGO, L.M.Q. **Uso de um sistema indicador biológico na avaliação do valor de esterilização aplicado a purê de cenoura processado em retorta rotativa**. Tese (Mestrado em Ciências de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1995.

CAMERON, M. S.; LEONARD, S. J.; BARRETT, E. L. Effect of Moderately Acidic pH on Heat Resistance of *Clostridium Sporogenes* Spores in Phosphate Buffer and in Buffered Pea Puree. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 39, n. 5, p. 943-949, 1980.

CAMPBELL, S.; RAMASWAMY, H. S. Heating Rate, Lethality and Cold Spot Location in Air-Entrapped Retort Pouches During Over-Pressure Processing. **Journal of Food Science**, v. 57, n. 2, p. 485-489, 1992.

CARCIOFI, B. A. M.; FAISTEL, J.; ARAGÃO, G. M. F.; LAURINDO, J. B. Determination of Thermal Diffusivity of Mortadella Using Actual Cooking Process Data. **Journal of Food Engineering**, v. 55, p. 89-94, 2002.

CARVALHO FILHO, C. D. **Utilização do bioteste com esporos de *Bacillus subtilis* na avaliação da integridade asséptica de embalagens flexíveis esterilizáveis**. Tese (Mestrado em Ciências de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1996.

CHANG, H.C.; CARPENTER, J.A.; TOLEDO, R.T. Modeling Heat Transfer During Oven Roasting of Unstuffed Turkeys. **Journal of Food Science**, v. 62, n. 1, p. 194-197, 2002.

CHANG, H.C.; CARPENTER, J.A. Optimizing Quality of Frankfurters Containing Oat Bran and Added Water. **Journal of Food Science**, v. 63, n. 2, p. 257-261, 1998

CHANG, S. Y.; TOLEDO, R. T. Simultaneous Determination of Thermal Diffusivity and Heat Transfer Coefficient during Sterilization of Carrot Dices in a Packed Bed. **Journal of Food Science**. v. 55, n. 1, p. 199-205, 1990.

CLOSTRIDIUM gas gangrene, Tetanus, food poisoning, Pseudomonas Colitis. Disponível em <www.geocities.com/SouthBeach/Port/3008/clost.html>. Acesso em: 09 nov. 2006

COEFFICIENT of Heat Transfer Unit Conversion Calculator. Disponível em <www.gordonengland.co.uk/conversion/coefft.htm>. Acesso em: 29 dez. 2006

CRISTIANINI, M. **Estudo da Distribuição de Temperaturas Durante o Processo de Esterilização de Atum (*Katsuwonus pelamis*) em Bolsa Flexível**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1998.

CRISTIANINI, M.; MASSAGUER, P. R. Thermal Process Evaluation of Retortable Pouches Filled With Conduction Heated Food. **Journal of Food Process Engineering**. v. 25, n. 5, p. 395-405, 2002.

DICKERSON, R. W. J. An Apparatus for the Measurement of Thermal Diffusivity of Foods. **Food Technology**. v. 19, n. 2, p. 198-204, 1965.

EVANS, K. W.; THORPE R.H.; ATHERTON, D. **Guidelines on Good Manufacturing Practice for Sterilisable Flexible Packaging Operations for Low-Acid Foods**. Technical Manual n.4, Campden & Chorleywood Food Preservation Research Association; 1978. 36p.

EVERSON, G. J.; LEONARD S.; LUH B. S.; SIMONE, M. Aseptic Canning of Foods. **Food Technology**. v.18, n.1, p. 81-86, 1964.

FARACO, C.B.; SEMINOTTI, N. **A Relação Homem-Animal e a Prática Veterinária**. Disponível em <http://www.cfmv.org.br/menu_revista/revistas/rev32/rev32.html> . Acesso em: 27 out. 2005

FREIRE, C. C. **Estudo da Esterilização Numa Autoclave Vertical Modificada Para o Termoprocessamento de Bolsas Flexíveis**. Tese (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1992.

FONTANA, A. J.; WACKER, B.; CAMPBELL, C.S.; CAMPBELL, G.S. **Simultaneous Thermal Conductivity, Thermal Resistivity, and Thermal Diffusivity Measurement of Selected Foods and Soils**. 2001 ASAE Annual

International Meeting, Sacramento, California, USA. Disponível em <www.decagon.com/appnotes/simultthermal.pdf> . Acesso em: 29 dez. 2006.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**. Third Edition. University of Minnesota, 1993. 921p.

GOLDONI, J. S.; KOJIMA, S.; LEONARD, S.; HEIL, J. R. Growing Spores of PA 3679 in Formulations of Beef Heart Infusion Broth. **Journal of Food Science** v.45, n. 3, p. 467-470, 1980.

GOLDONI, J. S.; MASSAGUER, P. R.; SCHMIDT, F. L.; TOSELLO, R.M.T. Determinação da Resistência de *Clostridium sporogenes* (PA3679) em Purê de Cenoura. **Brazilian Journal of Food Technology**. v.4, p. 27-31, 2001.

GOVARIS, A. K.; SCHOLEFIELD, J. Comparison of a Computer Evaluation with a Standard Evaluation of Retort Pouch Thermal Processing. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 23, p. 601-606, 1988.

GRISCHY, R. O.; SPECK, R. V.; ADAMS, D. M. New Media for Enumeration and Detection of *Clostridium sporogenes* (PA3679) Spores. **Journal of Food Science**, v. 48,p. 1466-1469, 1983.

GUIDELINES for the Establishment of Scheduled Heat Process for Low-Acid Foods. Campden & Chorleywood Food Research Association. Gloucestershire , UK, 1977, 80p.

HAYAKAWA, K. A Critical Review of Mathematical Procedures for Determining Proper Heat Sterelization Process. **Food Technology**. v. 32, n. 3, p. 59-83, 1978.

IKEDIALA, J.N.; CORREIA L. R.; FENTON G. A.; BEN-ABDALLAH N.; Finite Element Modeling of Heat Transfer in Meat Patties During Single-Sided Pan-Frying. **Journal of Food Science**, v. 61, n. 4, p. 796-802, 1996.

JACZYNSKI, J.; PARK, J. W. Temperature Prediction during Thermal Processing of Surimi Seafood. **Journal of Food Science**. v. 67, n. 8, p. 3053-3057, 2002.

KOUTCHMA, T.; GUO, B.; PATAZCA, E.; PARISI,B. High Pressure–High Temperature Sterilization: from Kinetic Analysis to Process Verification. **Journal of Food Process Engineering**, v.28 n.6 , p.610-629, 2005.

LEBOWITZ, S. F; BHOWMIK, S. R. Determination of Retortable Pouch Heat Transfer Coefficients by Optimization Method. **Journal of Food Science**. v. 54, n. 6, p. 1407-1412, 1989.

LOPEZ, A. **A Complete Course in Canning**. 11. ed. Canning Trade Inc, Maryland, Baltimore, 1981. Cap. 14.

MARKOWSKI, M.; BIALOBRZEWSKI, I.; CIERACH, M.; PAULO, A. Determination of Thermal Diffusivity of Lyoner Type Sausages During Water Bath Cooking and Cooling. **Journal of Food Engineering**, v. 65, p. 591-598, 2004.

McDONALD, K.; SUN, D.; LYNG, J. G. Effect of Vacuum Cooling on the Thermophysical Properties of a Cooked Beef Product. **Journal of Food Engineering**, v. 52, p. 167-176, 2002.

McGINNIS, D.S. Prediction of Transient Conduction Heat Transfer in Food Packaged in Flexible Retort Pouch. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal**, v.19, n.4, p.148-157, 1986.

MILLS, G.; EARNSHAW, R. PATTERSON, M.F. Effects of High Hydrostatic Pressure on Clostridium sporogenes spores. **Letters in Applied Microbiology**, v. 26, n. 3, p. 227-230, 1998.

MOURA, S. C. S. R.; VITALI, A. A.; FRANÇA, V. C. L. Propriedades Termofísicas de Soluções Modelo Similares a Creme de Leite. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v. 21, n. 2, 2001.

MULLEY, E. A.; STUMBO, C. R.; HUNTING, W. M. Thiamine: A Chemical Index of the Sterilization Efficacy of Thermal Processing. **Journal of Food Science**. v. 40, n. 5, p. 993-996, 1975.

MURPHY, R. Y.; MARKS, B. P.; MARCY, J. A. Apparent Specific Heat of Chicken Breast Patties and their Constituent Proteins by Differential Scanning Calorimetry. **Journal of Food Science**, v. 63, n. 1, p. 88, 1988.

NAVEH, D.; KOPELMAN, I. J.; PFLUG, I. J. The Finite Element Method in Thermal Processing of Foods. **Journal of Food Science**. v. 48, n. 4, p. 1086-1093, 1983.

NICOLAI, B. M.; BROEK, P. V. D.; SCHELLEKENS, M.; ROECK, G.; MARTENS, T.; BAERDEMAEKER, J. Finite Element analysis of heat conduction in lasagna during thermal processing. **International Journal of Food Science and Technology**. v. 30, n. 3, p. 347-363, 1995.

NGADI, M. O.; IKEDIALA, J. N. Heat Transfer Properties of Chicken-Drum Muscle. **Journal of Science in Food Agriculture**, v. 78, p. 12-18, 1998.

NIEKAMP, A.; UNKLESBAY, K.; UNKLESBAY, N.; ELLERSIECK, M. Thermal Properties of Bentonite-Water Dispersions Used for Modeling Foods. **Journal of Food Science**. v. 49, n. 1, p. 28-31, 1984.

- OCIO, M.J.; SÁNCHEZ, T.; FERNANDEZ, P.S.; RODRIGO, M.; MATÍNEZ, A. Thermal resistance characteristics of PA 3679 in temperature range of 110-121°C as affected by pH, type of acidulant and substrate. **International Journal of Food Microbiology**, v.22, n.4, p.239-247, 1994.
- OHLSSON, T. Optimal Sterilization Temperatures for Flat Containers. **Journal of Food Science**, v. 45, n. 4, p. 848-852, 1980.
- OLIVEIRA, G. S.; TRIVELIN, M. O.; LOPES FILHO, J. F.; THOMÉO, J. C. Thermo-Physical Properties of Cooked Ham. **International Journal of Food Properties**, v. 8, p. 387-394, 2005.
- OLIVEIRA, L. M.; DERRICO, F. A.; MARTINS, M. I. P.; ORTIZ, S. A.; ANJOS, V. D. A. **Retortable Pouch and Retortable Container**. Campinas, CETEA/ITAL, 1990. 24p.
- OLIVEIRA, L. M. Embalagens para *Pet Food*: Requisitos e Tendências de Mercado. **Pet food & health & Care**. n.10, p. 50-54, 2005.
- ORTIZ, S. A. **Desempenho de Embalagens Flexíveis para Alimentos Termoprocessados Quando Submetidos à Simulação de Manuseio e Transporte**. Tese (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.
- PAGEL, G. Brasil é o Segundo Maior Mercado Pet do Mundo, **ANBA**, São Paulo, ago. 2004. Seção Oportunidades de Negócios. Disponível em < www.anba.com.br/especial.php?id=149>. Acesso em 28 dez. 2006.
- PARK, K. J.; MURR, F. E. X.; SALVADEGO, M. Determinação Experimental da Condutividade Térmica do Queijo e da Carne Bovina. In: XVI Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 1998, Rio de Janeiro, 1998. v.3. p2048-2051
- PETERSON, W. R.; ADAMS, J. P. Temperature Sensor Placement Errors, in Institutional Size Retort Pouches. **Journal of Food Science**, v. 50, n. 1, p. 192-196, 1985.
- PEREZ, M.G.R. and CALVELO, A. Modeling the thermal conductivity of cooked meat. **Journal of Food Science**, v. 49, p. 152-156, 1984.
- PFLUG, I. J. **Microbiology and Engineering of Sterilization Processes**. Seventh Edition, Minneapolis, 1990.
- PINHO, C. R. G. **Modelamento Matemático do Processo de Esterilização de Alimentos Condutivos em Embalagem de Vidro**. Tese (Mestrado em

Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

PURI, V. M.; ANANTHESWARAN, R. C. The Finite-Element Method in Food Processing: A Review. **Journal of Food Engineering**. v. 19, n. 3, p. 247-274, 1993.

RAO, M. S; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**, New York: Marcel Dekker. 2. Ed, 1986. 398p.

RAMASWAMY, H. S.; CAMPBELL, S.; PASSEY, C. Temperature Distribution in a Standard 1-Basket Water- Cascade. **Journal of Food Science and Technology**. v. 24, n. 1 / 2, p. 900-904, 1991.

RAMASWAMY, H. S.; TUNG, M. A.; STARK, R. A Method to Measure Surface Heat Transfer from Steam / Air Mixtures in Batch Retorts. **Journal of Food Science**. v. 48, n. 3, p. 900-904, 1983.

RAVI SHANKAR, C. N.; SRINIVASA GOPAL, T. K.; VIJAYAN, P. K. Studies on Heat Processing and Storage of Seer Fish Curry in Retort Pouches. **Packaging Technology and Science**, v. 15, p. 3-7, 2002.

REIDY, G. A.; RIPPEN, A. L. Methods for Determining Thermal Conductivity in Foods. **Transactions of the ASAE**, Annual meeting, Paper n. 69-383, p.248-254, 1971.

RETORT advantages. **Petfood Industry**, Mt. Morris, IL, USA, v. 46 n. 6, p.30, jun. 2004.

RETORT effects: How Does Retorting Affect Wet Petfood Palatability? **Petfood Industry**, Mt. Morris, IL, USA, v. 47 n. 9, p.22, set. 2005.

RIVERA, J.A.; SEBRANEK, J.G.; RUST, R.E. Functional Properties of Meat By-products and Mechanically Separated Chicken (MSC) in a High-moisture Petfood System. **Meat Science**. v.55, n.1, p.61-66, 2000.

RODRIGO, M.; MARTINEZ, A. Determination of a Process Time for a New Product: Canned Low Acid Artichoke Hearts. **International Journal of Food Science and Technology**, v.23, n. 1, p. 31-41, 1988.

SANDBERG, G. M. M.; DURANCE, T. D.; RICHARD, P.; LEUNG, P. H. Thermal Processing Canned Meat with Sub-Freezing Initial Temperatures: Thermal and Microbial Validation. **Journal of Food Science**, v. 59, n. 4, p. 693-696, 1994.

SANTOS FILHO, G.C.; PENNA, T. C. V. Validação do Processamento Térmico de um Produto Protéico Vegetal Enlatado. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 39, n. 4, p. 391-401, 2003.

SARANTÓPOULOS, C.I.G.L.; OLIVEIRA, L.M.; CANAVESI, E. **Requisitos de conservação de alimentos em embalagens flexíveis**. Campinas, CETEA/ITAL, 2001. 213p.

SCHEERLINCK, N.; VERBOVEN, P.; FIKIIN, K. A.; De BAERDEMAEKER, J.; NICOLAÏ, B. M. Finite Element Computation of Unsteady Phase Change Heat Transfer During Freezing or Thawing of Food Using a Combined Enthalpy and Kirchhoff Transform Method. **Transactions of the ASAE**. v. 44, n. 2, p. 429-438, 2001.

SEGERLIND, L. J. **Applied Finite Element Analysis**. Second Edition. John Willey and Sons, 1984. 427p.

SENGER, W.P.; RAGUSA, T.J.; MARCUS, C.L.; SOUTTER, E.A. Biological Evaluation of a Heat Transfer Simulation for Sterilizing Low-Acid Large Particulate Foods for Aseptic Packaging. **Journal of Food Processing and Preservation** v. 13, p. 257-274, 1989.

SINDIRAÇÕES. <www.sindiracoes.com.br/asp/sindi_interna.asp?ir=sindi_perfil.asp&codigo=16502>. Acesso em 28 dez. 2006.

SINGH, R. P. Thermal Diffusivity in Food Processing. **Food Technology**. v. 36, n. 2, p. 87-91, 1982.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introduction to Food Engineering**. 2nd. Ed. Academic Press Inc. San Diego, CA, 1993. 499 p.

STAPLEY, A. G. F.; GLADDEN, L. F.; FRYER, P. J. A differential scanning calorimetry study of wheat grain cooking. **International Journal of Food Science and Technology**. v. 32, n. 6, p. 473-486, 1997.

STEFFE, J.F.; WILLIAMS, J. R.; CHHINNAW, M. S.; BLACK, J. R. Energy Requirements and Costs of Retort Pouch vs Can Packaging Systems. **Food Technology**, v. 34, n. 1 p. 39-43, 1980.

STOLF, S.R. Medição da Condutividade Térmica dos Alimentos. **Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos**, Campinas, n.29, p. 67-79, 1972.

STUMBO, C.R.; MURPHY, J.R.; COCHRAN, J. Nature of Thermal Death Time Curves for P.A. 3679 and *Clostridium botulinum*. **Food Technology**. v. 4. p. 321-326, 1950.

STUMBO, C. R. **Thermobacteriology in Food Processing**. Academic Press Inc. New York, N. Y, 1973. 263p.

SWEAT, V. E.; HAUGH, C. G. A Thermal Conductivity Probe for Small Food Samples. **Transactions of the ASAE**. v.17, n. 1, p. 56-58, 1974.

TANDON, S.; BHOWMIK, S. R. Evaluation of Thermal Processing of Retortable Pouches Filled with Conduction Heated Foods Considering Their Actual Shapes. **Journal of Food Science**, v. 51, n. 3, p 709-714, 1986.

TOCCI , A. M.; MASCHERONI, R. H. Characteristics of Differential Scanning Calorimetry Determination of Thermophysical Properties of Meats. **Lebensmittel-Wissenschaft&-Technologie**. v. 31, n. 5, p. 418-426, 1998.

TOWNSEND, C. T.; REED, J. M.; McCONNELL, J.; POWERS, M. J.; ESSELEN, W. B.; SOMERS, I. I.; DWYER, J. J.; BALL, C. O. Comparative Heat Penetration Studies on Jars and Cans. **Food Technology**, v. 3, n. 6, p. 213-226, 1949.

TSAI, S.; UNKLESBAY, N.; UNKLESBAY, K.; CLARKE, A. Thermal properties of restructured beef products at different isothermal temperatures. **Jornal of Food Science**, v.63, n. 3, p.481-484, 1998.

UNKLESBAY, N.; UNKLESBAY, K.; HSIEH, F.; SANDIK, K. Thermophysical Properties of Extruded Beef/Corn Flour Blends. **Jornal of Food Science**, v.57, n6, p.1282-1284, 1992.

VANDERPLAATS, G. N. **Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: With Applications**. Mc Graw-Hill Series in Mechanical Engineering, 1984. 333p.

VANDERZANT, C.; SPLITTSTOESSE, D. F. **Compendium of methods for the microbial examination of foods**. 3 ed. Washington: American Public Health Association, 1992. 1219p.

WANG, L.; SUN, D. Modelling Three-Dimensional transient heat transfer of roasted meat during Air Blast Cooling by the Finite Element Method. **Journal of Food Engineering**. v.51, n.4, p. 319-328, 2002.

WEINTRAUB, S. E.; RAMASWAMY, H. S.; TUNG, M. A. Heating Rates in Flexible Packages Containing Entrapped Air During Overpressure Processing, **Journal of Food Science**, v. 54, n. 6, p. 1417-1421, 1989.

WELT, B. A.; TONG, C. H.; ROSSEN, J. L.; LUND, D. B. Effect of Microwave Radiation on Inactivation of Clostridium sporogenes (PA2679) Spores. **Applied Environmental Microbiology**. v. 60, n. 2, p. 482-488, 1994.

ZANNI, A. **Pespectivas do Mercado Pet Food Brasileiro**. Disponível em <http://www.sindiracoes.com.br/asp/sindi_interna.asp?ir=sindi_artigos.asp&cod_artigo=9977>. Acesso em 02 nov. 2006

ANEXO I

Macro utilizada para a determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor (h),

```
Resume, pouch,db,,0
/SOLU
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
*dim,tin,,78
*dim,termopa1,,78
*dim,termopa2,,78
*dim,termopa3,,78
*dim,tm,,78
*dim,tm2,,78
*dim,tm3,,78
*vread,tin(1),autoclave,res
(1F6.2)
*vread,termopa1(1),termopa1,res
(1F6.2)
*vread,termopa2(1),termopa2,res
(1F6.2)
*vread,termopa3(1),termopa3,res
(1F6.2)
To=25.73
TUNIF,To
HH=529.81
HH2=409.55
HC=511.46
HC2=191.44
!
TH=11
TH2=49
TC=63
TC2=78
```

```
ASEL,ALL
ASEL,U,,, 112
OUTPR,ALL,
outres,all,all,
kbc,1
time,0.00001
sfa,all,1,conv,h,tin(1),
autots,on
deltim,60,0,0,0
lswrite,1
time,60
kbc,0
*do,i,2,TH
sfa,all,1,conv,HH,tin(i),
lswrite,i
time,(60*i)
*enddo
*do,i,(TH+1),TH2
sfa,all,1,conv,HH2,tin(i),
lswrite,i
time,(60*i)
*enddo
*do,i,(TH2+1),TC
sfa,all,1,conv,HC,tin(i),
lswrite,i
time,(60*i)
*enddo
*do,i,(TC+1),TC2
sfa,all,1,conv,HC2,tin(i),
lswrite,i
time,(60*i)
*enddo
lssolve,1,TC2,1,
/POST26

NSOL,2,2998,TEMP,,
```

```
LINES,300
VGET,tm(1),2
*cfopen,termores1,tmo
*vwrite,tm(1),,,,,,,,,
(1F6.2)
```

```
NSOL,3,4131,TEMP,,
LINES,300
VGET,tm2(1),3
*cfopen,termores2,tmo
*vwrite,tm2(1),,,,,,,,,
(1F6.2)
```

```
NSOL,4,5917,TEMP,,
LINES,300
VGET,tm3(1),4
*cfopen,termores3,tmo
*vwrite,tm3(1),,,,,,,,,
(1F6.2)
```

```
/post1
SSRQUR6d=0
X6d=0 ! POUCH 1
SSRQUR7d=0
X7d=0 ! pOUCH 2
SSRQUR8d=0
X8d=0 ! POUCH 3
```

```
*do,i,(TC+1),TC2
SSRQUR6d=SSRQUR6d+((tm(i)-termopa1(i))**2)
X6d=X6d+(((tm(i)-termopa1(i))**2)/tm(i))
SSRQUR7d=SSRQUR7d+((tm2(i)-termopa2(i))**2)
X7d=X7d+(((tm2(i)-termopa2(i))**2)/tm2(i))
SSRQUR8d=SSRQUR8d+((tm3(i)-termopa3(i))**2)
```

```
X8d=X8d+(((tm3(i)-termopa3(i))**2)/tm3(i))
*enddo
```

```
*cfclos
finish
save
```

```
/OPT
OPANL,pobento2,mac
OPVAR,HC2,DV,50,240,5
OPVAR,X7d,OBJ,,,0.01
OPTYPE,SUBP
OPSUBP,30
OPLOOP,,,SCALAR
OPEXE
OPLIST,ALL,,,1
/OPT
OPSAVE,'2hc2a','',''
OPCLR
```

ANEXO II

Macro utilizada para cálculo da temperatura no ponto onde estava posicionado o termossensor rígido nos ensaios de validação do modelo de temperatura.

```
Resume, pouch,db,,0
/SOLU
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
*dim,tin,,80
*dim,tm,,80
*vread,tin(1),autoclave,res
(1F6.2)
*dim,media,array,3098,80,1,,

To=19.77
TUNIF,To
HH=828.72
HH2=538.46
HC=1293.57
HC2=183.57!

TH=11
TH2=49
TC=63
TC2=80
ASEL,All
ASEL,U, , ,112,144

OUTPR,ALL,
outres,all,all,
kbc,1
time,0.00001
sfa,all,1,conv,h,tin(1),
autots,on
```

```
deltim,60,0,0,0
lswrite,1
time,60
kbc,0
*do,i,2,TH
sfa,all,1,conv,HH,tin(i),
lswrite,i
time,(60*i)
*enddo
*do,i,(TH+1),TH2
sfa,all,1,conv,HH2,tin(i),
lswrite,i
time,(60*i)
*enddo
*do,i,(TH2+1),TC
sfa,all,1,conv,HC,tin(i),
lswrite,i
time,(60*i)
*enddo
*do,i,(TC+1),TC2
sfa,all,1,conv,HC2,tin(i),
lswrite,i
time,(60*i)
*enddo
lssolve,1,TC2,1,

/post26
NSOL,2,99,TEMP,,
LINES,300
VGET,tm(1),2
*cfopen,termores1,tmo
*vwrite,tm(1),,,,,,,,,
(1F6.2)
```

ANEXO III

Macro utilizada para cálculo da temperatura no ponto frio da embalagem (nó 1), F_p , F_m e F_m por elemento.

```
Resume, pouch,db,,0
/SOLU
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
*dim,tin,,98
*dim,termopa1,,98
*dim,tm2,,98
*dim,tm3,,98
*vread,tin(1),autoclave,res
(1F6.2)
*vread,termopa1(1),termopa1,res
(1F6.2)
*dim,media,array,2873,98,1,,

To=29.32
TUNIF,To
HH=828.72
HH2=538.46
HC=1293.57
HC2=183.57
!
TH=10
TH2=47
TC=61
TC2=98
ASEL,All
ASEL,U,, , 112,144

OUTPR,ALL,
outres,all,all,
```

```
kbc,1
time,0.00001
sfa,all,1,conv,h,tin(1),
autots,on
deltim,60,0,0,0
lswrite,1
time,60
kbc,0
*do,i,2,TH
sfa,all,1,conv,HH,tin(i),
lswrite,i
time,(60*i)
*enddo
*do,i,(TH+1),TH2
sfa,all,1,conv,HH2,tin(i),
lswrite,i
time,(60*i)
*enddo
*do,i,(TH2+1),TC
sfa,all,1,conv,HC,tin(i),
lswrite,i
time,(60*i)
*enddo
*do,i,(TC+1),TC2
sfa,all,1,conv,HC2,tin(i),
lswrite,i
time,(60*i)
*enddo
lssolve,1,TC2,1,

/post26
NSOL,2,135,TEMP,,
LINES,300
VGET,tm2(1),2
*cfopen,termores2,tmo
*vwrite,tm2(1),,,,,,,,,
```

(1F6.2)

! LETALIDADE NO PONTO FRIO

```
*dim,Fp,array,98
*dim,L,array,98
  *do,i,1,TC2
    L(i)= 1*(10**((tm2(i)-115)/15.63))
  *enddo
  *do,i,2,TC2
    Fp(1)=L(1)
    Fp(i)=Fp(i-1)+L(i)
  *enddo
```

```
/post1
*do,i,1,TC2
  set, , , 1, , , , i,
  etable,t,temp,
  *vget,media(1,i),elem,,etab,t,,
  etable,,erase, 1
*enddo
```

```
/post1
*dim,C,array,245
*dim,C2,array,2873
*dim,Fm,array,98
*do,i,1,245
  C(i)=100
*enddo
*do,i,246,2873
  C2(i)=100
*enddo
etable,ve,volu
  *do,i,1,TC2,1
    CT=0
    CT2=0
```

```
VP=0
VP2=0
*do,j,1,245
  D=9.76*(10**((115-media(j,i))/15.04))
  Co=C(j)
  C(j)=Co*(10**(-1/D))
  *get,volu,elem,j,etab,ve
  CT=CT+volu*C(j)
  VP=VP+volu
*enddo
*do,k,246,2873
  D2=9.45*(10**((115-media(k,i))/15.63))
  Co2=C2(k)
  C2(k)=Co2*(10**(-1/D2))
  *get,volu,elem,j,etab,ve
  CT2=CT2+volu*C2(k)
  VP2=VP2+volu
*enddo
Fm(i)=(9.76*(log10(100*(VP/CT)))+(9.45*(log10(100*(VP2/CT2))))
*enddo

/post26
*cfopen,arqFm,tmo
*vwrite,Fm(1),,,,,,,
(1F6.2)
*cfopen,arqFp,tmo
*vwrite,Fp(1),,,,,,,
(1F6.2)
*cfclos
```

