



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA**



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM
ALIMENTOS COM FORMA PARALELEPIPEDAL. ESTUDO DE CASO:
RESFRIAMENTO E CONGELAMENTO DE BATATAS**

MESQUITA DA SILVA

3.3) **Biblioteca UFCG
SMBC_CDSA
CAMPUS DE SUMÉ
Reg. 12447/13**

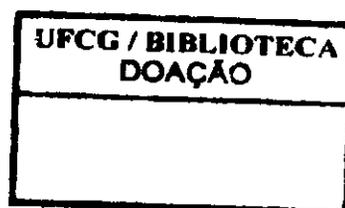
**CAMPINA GRANDE
PARAÍBA**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**Modelagem e Simulação da Transferência
de Calor em Alimentos com Forma
Paralelepipedal. Estudo de Caso:
Resfriamento e Congelamento de Batatas**

UFCC - BIBLIOTECA

*Dis
631(043.3)
S586m
ex. 01*



Autor: **Manassés Mesquita da Silva**
Orientadores: **Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia**
Antonio Gilson Barbosa de Lima

UFCC - BIBLIOTECA

Campina Grande, fevereiro de 2005

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**Modelagem e Simulação da Transferência
de Calor em Alimentos com Forma
Paralelepipedal. Estudo de Caso:
Resfriamento e Congelamento de Batatas**

Autor: Manassés Mesquita da Silva

**Orientadores: Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia
Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Curso: Engenharia Agrícola

Área de concentração: Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Agrícola, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

**Campina Grande, fevereiro de 2005
PB- Brasil**

S586m Silva, Manassés Mesquita da
Modelagem e simulação da transferência de calor em alimentos com forma
paralelepipedal: estudo de caso: resfriamento e congelamento de batatas /
Manassés Mesquita da Silva. — Campina Grande: UFCG, 2005.
64f. : il. color.

Inclui Bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Orientadores: Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia
Antonio Gilson Barbosa de Lima

1— Batata palito - Difusão de calor —2 Volumes finitos 3— Produtos
Agrícolas- Processamento I— Título

CDU 633.491



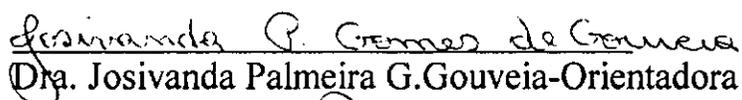
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

MANASSÉS MESQUITA DA SILVA

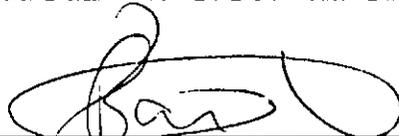
**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR
EM ALIMENTOS COM FORMA PARALELEPIPEDAL. ESTUDO DE
CASO: RESFRIAMENTO E CONGELAMENTO DE BATATAS**

BANCA EXAMINADORA

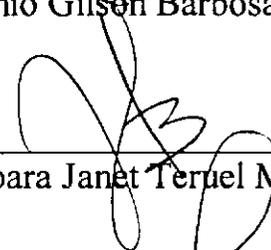
PARECER


Dra. Josivanda Palmeira G. Gouveia-Orientadora

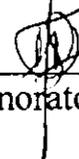
APROVADO COM DISTINÇÃO


Dr. Antônio Gilson Barbosa de Lima-Orientador

Aprovado com distinção


Dra. Bárbara Janet Teruel Mederos-Examinadora

APROVADO COM DISTINÇÃO


Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva-Examinador

Aprovado com distinção

FEVEREIRO - 2005

*A Deus
Aos meus pais Manoel Pedro da Silva
e Eri Mesquita da Silva*

*O coração do homem pode fazer planos,
mas a resposta certa
vem dos lábios do SENHOR.
Pv16.1*

AGRADECIMENTOS

A Deus, autor de todas as coisas! Sem Ele nada seria possível!

Aos professores orientadores, Dra. Josivanda Palmeira e Dr. Antonio Gilson, pelo apoio, incentivo e amizade durante a realização do trabalho.

A toda minha família pelo apoio incondicional!

A querida esposa Waleska Rhossany pelo incentivo, carinho e amor!

A todos os professores do programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, em especial aos da área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas.

Ao Prof. Dr. José Jefferson da Silva, pelas relevantes contribuições ao trabalho.

A Profa. Dra. Bárbara Janet Teruel e ao Prof. Dr. Flávio Luiz, pelas valiosas sugestões e correções.

A todos os colegas de curso, em especial a José Cleidimário, Jedman, Taciana, Hozênia e Rhovisk, pela amizade e convivência agradável;

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos!

A todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xii
1 Introdução.....	1
2 Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 A batata.....	4
2.1.1 Aspectos gerais.....	4
2.1.2 Processamento e beneficiamento.....	5
2.2 O Fenômeno do congelamento: aspectos físicos envolvidos.....	7
2.2.1 Congelamento: Importância e benefícios.....	7
2.2.2 As cinéticas de resfriamento, congelamento e pós-congelamento.....	7
2.2.3 Propriedades termofísicas.....	9
2.2.4 Cristalização durante o congelamento.....	10
2.2.5 Perda de peso durante o resfriamento.....	12
2.2.6 Teor de umidade inicial.....	13
2.3 Modelagem matemática do processo.....	14
2.3.1 Métodos analíticos e empíricos.....	15

2.3.2 Métodos numéricos.....	16
3 Material e Métodos.....	19
3.1 O Problema Físico.....	20
3.2 Modelagem Matemática.....	20
3.3 Metodologia Numérica.....	22
3.4 Aplicações.....	33
3.4.1 Ajuste do modelo aos dados experimentais.....	33
3.4.2 Simulação para várias dimensões do produto.....	34
3.4.3 Simulação para vários teores de umidade inicial do produto.....	35
4 Resultados e Discussões.....	36
4.1 Validação da metodologia.....	36
4.2 Simulação de congelamento.....	43
4.2.1 Influência das dimensões do produto.....	43
4.2.2 Influência do conteúdo de umidade inicial do produto.....	49
5 Conclusões e Sugestões.....	56
5.1 Conclusões.....	56
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	57
6 Referências Bibliográficas.....	58



RESUMO

SILVA, Manassés Mesquita da, *Modelagem e Simulação da Transferência de Calor em Alimentos com Forma Paralelepipedal. Estudo de Caso: Resfriamento e Congelamento de Batatas*. Campina Grande: UFCG, 2005. 64p. Dissertação Mestrado

O congelamento de produtos alimentícios é um método de preservação amplamente utilizado na indústria de alimentos, porque combina o efeito de baixas temperaturas com a transformação da água existente no produto em gelo. O conhecimento das propriedades de transporte e a distribuição de temperatura no interior destes produtos são de fundamental importância para um projeto otimizado de sistemas de refrigeração. Neste sentido, apresenta-se, uma modelagem matemática tridimensional transiente para descrever a transferência de calor no interior de sólidos com forma de paralelepípedos, incluindo mudança de fase. A equação governante foi resolvida numericamente utilizando a técnica dos volumes finitos com uma formulação totalmente implícita. Como aplicação a metodologia foi usada para prever a transferência de calor durante o resfriamento congelamento e pós-congelamento de batata palito pré-processadas (*french fry*). Resultados numéricos da temperatura no centro do produto foram ajustados aos dados experimentais reportados na literatura e um bom ajuste foi obtido, caracterizando a validação física do modelo. Por meio de simulações, avaliou-se a influência das dimensões e do teor de umidade inicial da batata na cinética de congelamento. Verificou-se que, quanto menores as dimensões e o teor de umidade inicial do produto, mais rapidamente ocorre a mudança de fase da água no seu interior. Os maiores gradientes de temperatura foram encontrados na superfície próximo à região do vértice do sólido.

Palavras Chave:

Volumes Finitos, temperatura, difusão de calor, numérico, Batata Palito

ABSTRACT

SILVA, Manassés Mesquita da, *Modeling and Simulation of Heat Transfer in Foods with Paralelepiped Form. Case Studied: Cooling and Freezing of potatoes*. Campina Grande: UFCG, 2005. 64p. Dissertação Mestrado

The freezing foods product is a preservation method wide used in the food industry, because it combines the favorable effect of low temperatures with the conversion of water into ice. The knowledge of the transport properties and the temperature distribution inside these products are of fundamental importance for an optimized project of refrigeration systems. In this sense, this work presents a transient three-dimensional mathematical modeling to describe the heat transfer inside solids with parallelepiped shape including phase change. The governing equation was solved numerically using the finite-volumes technique and a implicit fully formulation. As application, the methodology was used to predict the heat transfer during the cooling, freezing and post-freezing of french fry. Numerical results of the temperature in the center of the product were compared to the experimental data reported in the literature and a good agreement was obtained, characterizing the physical validation of the model. By means of simulation, it was verified influence of the dimensions and the initial moisture content of the potato in the freezing kinetic, that is, how much lesser the dimensions and the initial moisture content of the product, more quickly occur the phase change of the water in its interior. The largest temperature gradients were found in the close surface to the area of the vertex of the solid.

UFCG - BIBLIOTECA

Key Words:

Finite-Volume, temperature, heat diffusion, numerical, french fry

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de uma linha de produção de batata palito pré-processada.....	6
Figura 2.2. Transferência de calor durante o resfriamento, congelamento e pós-congelamento de um produto alimentício; T_1 e T_2 – temperatura inicial e final do produto no centro; t_r – tempo de resfriamento; t_c – tempo de congelamento; t_{pc} – tempo de pós-congelamento	8
Figura 2.3. Variação da taxa de congelamento de um produto alimentício (<i>starch gel</i>). Medida de temperatura no centro do produto.....	9
Figura 2.4. Estrutura dos cristais de gelo no interior de um produto alimentício (<i>gelatin gel</i>). (a) corte paralelo ao fluxo de calor (6,4 x); (b) corte perpendicular ao fluxo de calor no centro do material (80 x).....	11
Figura 2.5. Microestrutura de um produto alimentício (<i>gelatin gel</i>) congelado à diferentes pressões. (a) 100 MPa (-8,4° C); (b) 150 MPa (-14° C); (c) 200 MPa (-20°).....	12
Figura 3.1. Esquema da configuração geométrica do problema fisico.....	20
Figura 3.2. Volume de controle diferencial utilizado.....	23
Figura 3.3. Posição da propriedade k na interface i entre os pontos P e E.....	29
Figura 3.4. Fluxograma do código computacional implementado.....	32
Figura 3.5. Esquema de uma fatia de batata pré-processada mostrando o local de medição de temperatura.....	33
Figura 4.1. Valores experimentais e numéricos durante o processo de transferência de calor com mudança de fase ($U_o=72,73$ %b.u.).....	37
Figura 4.2. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 150 s; (b) 313 s; (c) 646 s; (d) 978 s; (e) 1089 s; e (f) 1188 s. $U_o=73,72$ % b.u. (dimensões 10x10x60mm).....	40
Figura 4.3. Distribuição de temperatura nos planos $y=R_2/2=0,0025$ m e $z=R_3/2=0,015$ m nos tempos (a) 150 s; (b) 313 s; (c) 646 s (d) 978 s; (e) 1089 s; e (f) 1188 s. $U_o=73,72$ % b.u. (dimensões 10x10x60mm).....	41

Figura 4.4. Distribuição de temperatura nos planos $y=R_2=0,005\text{m}$ e $z=R_3=0,030\text{m}$, nos tempos (a) 150 s; (b) 313 s; (c) 646 s; (d) 978 s; (e) 1089 s; e (f) 1188 s. $U_o=73,72\%$ b.u. (dimensões $10\times 10\times 60\text{mm}$).....	42
Figura 4.5. Influência das dimensões da batata pré-processada em sua cinética de resfriamento e congelamento ($U_o=0,7372$ b.u.).....	44
Figura 4.6. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 150 s; (b) 300 s; (c) 494 s; (d) 688 s; (e) 944 s; e (f) 1188 s. $U_o=73,72\%$ b.u. (dimensões $10\times 10\times 10\text{mm}$).....	46
Figura 4.7. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 150 s; (b) 313 s; (c) 586 s; (d) 859 s; (e) 1029 s; e (f) 1188 s. $U_o=73,72\%$ b.u. (dimensões $10\times 10\times 20\text{mm}$).....	47
Figura 4.8. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 150 s; (b) 313 s; (c) 622 s; (d) 931 s; (e) 1065 s; e (f) 1188 s. $U_o=73,72\%$ b.u. (dimensões $10\times 10\times 30\text{mm}$).....	48
Figura 4.9. Influência do conteúdo de umidade inicial da batata pré-processada em sua cinética de resfriamento e congelamento (Dimensões: $10\times 10\times 60$ mm).....	49
Figura 4.10. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 230 s; (b) 564 s; (c) 600 s; (d) 724 s; (e) 974 s; e (f) 1188 s. $U_o=20,0\%$ b.u. (dimensões $10\times 10\times 60\text{mm}$).....	51
Figura 4.11. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 230 s; (b) 444 s; (c) 600 s; (d) 664 s; (e) 974 s; e (f) 1188 s. $U_o=30,0\%$ b.u. (dimensões $10\times 10\times 60\text{mm}$).....	52
Figura 4.12. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 230 s; (b) 432 s; (c) 600 s; (d) 736 s; (e) 974 s; e (f) 1188 s. $U_o=40,0\%$ b.u. (dimensões $10\times 10\times 60\text{mm}$).....	53
Figura 4.13. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 230 s; (b) 432 s; (c) 600 s; (d) 809 s; (e) 974 s; e (f) 1188 s. $U_o=50,0\%$ b.u. (dimensões $10\times 10\times 60\text{mm}$).....	54

UFCC - BIBLIOTECA

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Modelos de predição do tempo de congelamento e resfriamento.....	18
Tabela 3.2. Dados utilizados na simulação de congelamento de batata para vários teores de umidade inicial.....	35
Tabela 4.1. Valores da condutividade térmica de batata reportados na literatura.....	39
Tabela 4.2. Tempos de processo para várias dimensões características da batata palito.....	45
Tabela 4.3. Parâmetros de processo para vários teores de umidade da batata.....	50

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO



Mudanças nos hábitos alimentares da população, nas últimas décadas, têm provocado um aumento contínuo no consumo de produtos congelados (Moureh & Derens, 2000). Portanto, o controle e o conhecimento do processo de transferência de calor durante o congelamento de produtos alimentícios é extremamente importante.

O congelamento é um tratamento físico amplamente empregado em operações de conservação, secagem e liofilização de produtos alimentícios em geral.

O processo de congelamento é um eficiente meio de conservação de produtos alimentícios porque combina o efeito de baixas temperaturas com a transformação em gelo da água líquida contida no material. Para temperaturas inferiores a -10° C, poucos microorganismos conseguem se desenvolver e as taxas de reações químicas, bem como, as reações do metabolismo celular são drasticamente reduzidas (Delgado & Sun, 2001). Neste contexto, a predição do tempo de resfriamento e congelamento, bem como a determinação das propriedades termofísicas envolvidas no processo, são parâmetros indispensáveis no dimensionamento e otimização de sistemas de refrigeração. Fatores como a minimização do consumo de energia, confiabilidade, a segurança e a qualidade do produto, também devem ser considerados.

Produtos alimentícios, em geral, podem ser definidos como uma mistura complexa de carboidratos, proteínas, lipídeos, água e uma enorme variedade de outros componentes em menor quantidade (Ross, 2003). Devido a isto, a formulação matemática representativa do fenômeno de congelamento destes materiais torna-se uma tarefa muito complexa.

Os processos de resfriamento e congelamento de produtos alimentícios são fenômenos de natureza extremamente complexa (Delgado & Sun, 2001). Neste caso, a formulação matemática deve ser ampla e abrangente, considerando a transferência de calor com mudança de fase, bem como propriedades termofísicas variáveis. As soluções dos modelos matemáticos desenvolvidos para esse fim, variam de simples soluções analíticas e/ou empíricas (baseadas numa série de aproximações e suposições) a sofisticadas metodologias numéricas onde o problema é tratado de forma mais abrangente.

Especificamente, durante o congelamento (mudança de fase) de um produto alimentício, suas propriedades termofísicas mudam constantemente. Isto se deve ao fato da variação contínua da fração de sólido e, conseqüentemente, da fração de líquido no interior do material, até que o mesmo se solidifique por completo. Nesta situação, é recomendada a utilização de técnicas numéricas para obtenção da solução da equação governante em todo domínio de tempo: resfriamento, congelamento e pós-congelamento. É importante ressaltar que a correta formulação matemática do fenômeno físico em estudo, é de fundamental importância na confiabilidade dos resultados a serem obtidos.

A solução numérica da equação de transferência de calor, num domínio tridimensional transiente, ajustada a dados experimentais de cinética de congelamento de materiais biológicos, possibilita investigar com maior precisão o que ocorre, em termos de temperatura, no interior do material (por meio da análise da distribuição de temperatura). A influência de parâmetros como tamanho, teor de umidade inicial, e condições de processo, podem ser verificadas na cinética de resfriamento e/ou congelamento do produto. O conhecimento de tais influências é indispensável, uma vez que permite um melhor planejamento e otimização de processos e sistemas de resfriamento e congelamento numa linha de produção de produtos em escala industrial.

Do exposto, o presente trabalho tem como objetivos:

- ✓ Apresentar uma modelagem matemática para descrever o fenômeno de resfriamento, congelamento e pós-congelamento de sólidos com forma de paralelepípedo, com particular referência a fatias de batatas pré-processadas (*french fry*);
- ✓ Apresentar solução numérica para o problema considerado, utilizando a técnica dos volumes finitos;
- ✓ A partir do ajuste dos dados numéricos a dados experimentais (obtidos na literatura), obter os coeficientes de condução de calor (interior do produto) e convecção térmica (superfície do material);
- ✓ Verificar, por meio de simulação, o efeito das dimensões e do teor de umidade inicial, na cinética de resfriamento, congelamento e pós-congelamento do produto e obter a distribuição de temperatura no interior do material para vários tempos de processo.

A formulação numérica apresentada poderá ser aplicada a qualquer material com forma de paralelepípedo, submetido a condições de transferência de calor, seja ela de congelamento, descongelamento ou aquecimento.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Batata

2.1.1 Aspectos gerais

A batata, cujo nome científico é *Solanum tuberosum* L., da família Solanaceae é originária da América do Sul, particularmente dos altiplanos da Bolívia e Peru. Ela é um dos alimentos mais consumidos do mundo devido à sua composição, versatilidade gastronômica e tecnológica, bem como baixo custo, sendo suplantada apenas pelo trigo, arroz e milho (Coelho et al., 1999).

Na mesa do brasileiro, a batata ainda não tem tanto destaque. O consumo nacional *per capita* é de 12 a 13 quilogramas por ano, enquanto na maior parte dos países desenvolvidos a média anual por habitante é superior a 60 quilogramas. No entanto, o consumo interno tende a aumentar, principalmente pelos produtos derivados. A produtividade das lavouras brasileiras ainda é de 22,4 toneladas de batata por hectare, com uma produção bruta de três milhões de toneladas (IBGE, 2003). Na Europa, as lavouras alcançam em média 40 toneladas por hectare.

Segundo dados da FAO (2002), o Brasil importou cerca de 92 mil toneladas de batatas, sendo 88 mil toneladas de batatas congeladas e 4 mil toneladas de batatas *in natura*. Confirmando a expansão do mercado internacional desta *commodity*.

Por ser rica em carboidratos, a batata é grande fonte de energia. Contém ainda sais minerais, vitamina C e, em pequenas quantidades, vitaminas do Complexo B. Batatas frescas contêm mais de 30 mg de vitamina C por cada 100 gramas do produto (Haase & Weber, 2003).

2.1.2 Processamento e beneficiamento

O processamento da batata é hoje uma indústria muito forte e competitiva, principalmente na Europa e nos Estados Unidos, onde o consumo de batata, nas suas diferentes formas industrializadas, faz com que grandes complexos industriais transformem a batata *in natura* em toneladas de *chips*, *french fries* (fatias de batata frita à francesa), amido, fécula, dentre outros.

No Brasil, onde o consumo é por excelência na forma *in natura*, somente agora, é que esta indústria vem se estabelecendo, tendo por objetivo o abastecimento do mercado *fast food*, basicamente na forma de *french fries* congelados, *chips* e batata palha. Portanto, ultimamente, a indústria brasileira vem buscando novas perspectivas de industrialização do produto, objetivando aumentar a oferta, baixar os preços, reduzir as perdas e aumentar o consumo.

A produção de batata palito congelada envolve algumas operações unitárias, ou seja, recepção, armazenamento, processamento e por fim a distribuição do produto final. As batatas *in natura* chegam à unidade em caminhões e são armazenadas em silos. Depois seguem em transportadores de correia para linha de produção. Primeiramente as batatas são descascadas e fatiadas em tamanhos característicos (a pedido do cliente). Um sofisticado sistema de seleção elimina da linha de produção qualquer pedaço de batata fora do padrão estabelecido. As batatas fatiadas são então parcialmente cozidas (branqueamento). Na sequência, as batatas passam por um secador. A secagem regula a umidade do produto que influenciará na textura do produto final obtido. Depois de submetidas ao processo de secagem, as fatias de batatas são parcialmente fritas. Em seguida o produto é congelado, embalado e distribuído (Montague et al., 2003). Na Figura 2.1 encontra-se um esquema de uma unidade produtora.

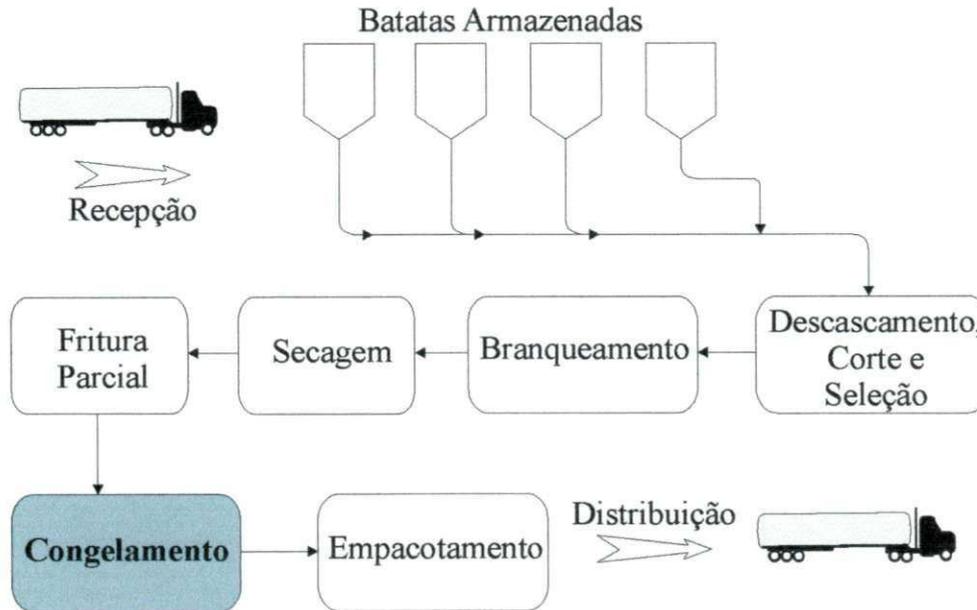


Figura 2.1. Esquema de uma linha de produção de batata palito pré-processada. Fonte: Montague et al. (2003)

Em seus estudos, Montague et al. (2003) destacam a importância da capacidade de adequação da unidade de processamento para atender as necessidades de seus clientes. Os principais parâmetros de variação exigidos pelos clientes estão relacionados ao tamanho do produto e ao seu teor de umidade inicial. Estes parâmetros influenciam diretamente no tempo de processo e também na qualidade final do produto obtido.

Haase & Weber (2003) relatam a influência da área superficial das fatias de batata na degradação de vitamina C durante o processamento. No caso específico do congelamento, a razão (área superficial)/(volume) do produto bem como seu teor de umidade inicial influenciam fortemente na cinética de resfriamento e congelamento do produto.

LeBlanc et al. (1990a) realizaram experimentos de congelamento de batata frita determinando a cinética de diminuição de temperatura para vários pontos no interior do material. E concluíram que os maiores gradientes de temperatura ocorrem junto à superfície, particularmente, na região do vértice do material.

2.2 O fenômeno do congelamento: aspectos físicos envolvidos

2.2.1 Congelamento: importância e benefícios

Nas últimas décadas tem-se verificado uma mudança nos hábitos alimentares, conduzindo continuamente a um aumento no consumo de produtos congelados (Moureh & Derens, 2000). Daí decorre a importância de estudos que promovam a otimização dos processos de produção visando diminuir os custos de operação, aumentando a oferta e, conseqüentemente, tornando estes produtos mais acessíveis.

Segundo LeBlanc et al. (1990a) o congelamento é um excelente método para manter as características de uma grande variedade de produtos alimentícios. Se o congelamento e subsequente armazenamento forem feitos corretamente, as características do material podem permanecer inalteradas por um longo período. Uma considerável fração de água livre no produto (mais de 80%) pode ser convertida em gelo e permanecer neste estado durante o armazenamento, minimizando mudanças físicas, bioquímicas e microbiológicas que causam a deterioração do produto.

Fikiin & Fikiin (1999) relataram a importância de um bom conhecimento das características termofísicas, de uma ampla faixa de produtos alimentícios, para prever com precisão a distribuição transiente de temperatura e a duração do processo, bem como estimar o consumo de energia durante o resfriamento e congelamento desses produtos. Por meio destas informações é possível viabilizar, com base científica, o controle de qualidade dos produtos, a otimização do processo e também operar com eficiência os sistemas térmicos refrigerantes na indústria de biotecnologia de alimentos.

2.2.2 As cinéticas de resfriamento, congelamento e pós-congelamento

Na Figura 2.2 tem-se representada graficamente a curva típica de congelamento de alimentos. O processo de redução de temperatura divide-se em três fases: resfriamento (a-b), congelamento (b-c) e pós-congelamento (c-e) (Delgado & Sun, 2001; Rahman et al., 2002).

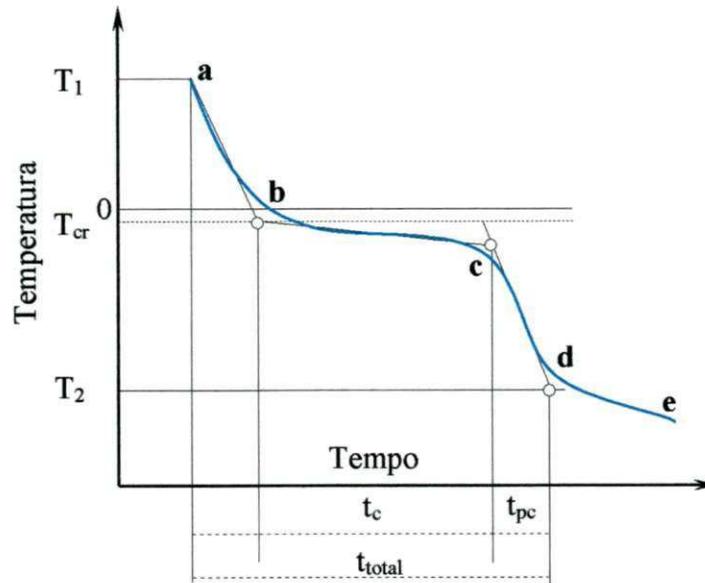


Figura 2.2. Transferência de calor durante o resfriamento, congelamento e pós-congelamento de um produto alimentício; T_1 e T_2 – temperatura inicial e final do produto no centro; t_r – tempo de resfriamento; t_c – tempo de congelamento; t_{pc} – tempo de pós-congelamento

A primeira fase, que corresponde ao tempo decorrido de **a** a **b**, o produto é resfriado desde a temperatura inicial T_1 até à temperatura crioscópica (inicial de congelamento) T_{cr} . O tempo decorrido de **b** a **c** corresponde ao período de congelamento da maior parte da água existente no material. Para substâncias puras, este processo ocorre à temperatura constante. Porém, no caso de soluções complexas (solução aquosa no interior dos alimentos), o congelamento ocorre numa determinada faixa de temperatura, o que confere à curva uma ligeira inclinação. O tempo decorrido de **c** a **e**, é o período em que o produto continua a perder calor até atingir o equilíbrio térmico com o meio refrigerante.

Rahman et al. (2002) baseados na análise da curva de resfriamento e congelamento de um produto alimentício (*starch gel*), determinaram o início e o fim do processo de congelamento. A análise foi feita por meio da taxa de congelamento ($^{\circ}\text{C min}^{-1}$) durante todo o processo. Por este método, a taxa de congelamento é plotada num plano cartesiano em função do tempo. Na Figura 2.3 observa-se o resultado experimental obtido por estes autores.

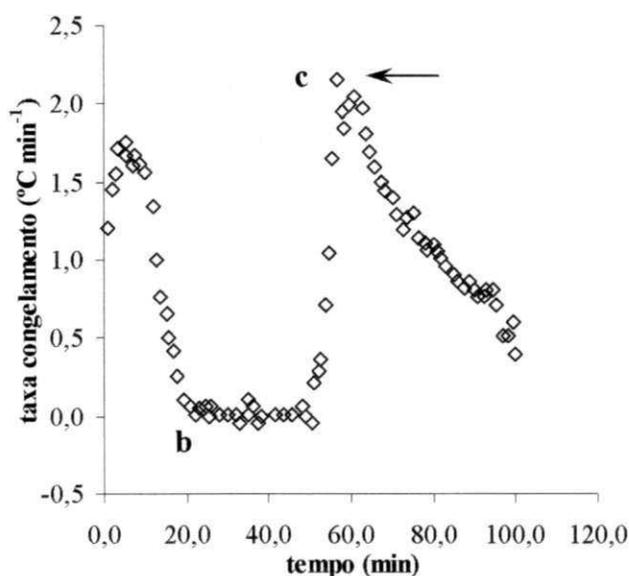


Figura 2.3. Variação da taxa de congelamento de um produto alimentício (*starch gel*). Medida de temperatura no centro do produto. Fonte: Rahman et al. (2002)

No início do processo de congelamento propriamente dito, a taxa cai significativamente até o ponto **b** que é identificado como início da nucleação do gelo. Devido à formação do gelo, a taxa fica aproximadamente constante. Com a continuação do processo, a taxa de congelamento aumenta bruscamente até a um valor máximo **c**. O ponto final de congelamento ocorre quando a taxa começa a decrescer a partir do seu valor máximo.

O ponto inicial de congelamento é uma das mais importantes propriedades termodinâmicas de produtos congelados. Este dado pode ser utilizado para calcular propriedades como peso molecular, atividade de água, água livre, de ligação, água congelada e entalpia abaixo do congelamento (Rahman et al. 2002).

2.2.3 Propriedades termofísicas

Na análise da transferência de calor, o conhecimento das propriedades termofísicas é extremamente importante. Estas propriedades compreendem, basicamente, duas categorias: as propriedades de transporte (condutividade térmica, viscosidade cinemática) e propriedades de equilíbrio ou termodinâmicas (densidade, calor específico). A magnitude dessas propriedades varia de acordo com o produto em estudo e está intimamente ligada à estrutura física do

material, ou seja, depende do estado físico em que a matéria se encontra (Incropera & DeWitt, 2002).

Vários autores têm relatado a importância do conhecimento das propriedades térmicas para simulação de congelamento e descongelamento de produtos alimentícios (Lind, 1991; Rahman, 1992; Fikiin & Fikiin, 1999; Fricke & Becker, 2002; Becker & Fricke, 2004).

2.2.4 Cristalização durante o congelamento

O fenômeno da cristalização durante o processo de congelamento de produtos alimentícios tem grande influência na qualidade e durabilidade do produto final obtido. A grande vantagem da transição água-gelo é a fixação da estrutura do tecido biológico e transformação de uma fração de água na forma de cristais de gelo, tornando-a indisponível como solvente ou componente de reações químicas no interior do material. Conseqüentemente, a difusão de outros solutos no interior do material é muito baixa. Contudo, o tamanho e a localização do cristal de gelo podem causar danos às membranas celulares e à estrutura física do material congelado. A causa dessa indesejável modificação físico-química durante o congelamento é a cristalização da água juntamente com alguns solutos. Nesta situação, a diminuição do tempo do período de mudança de fase contribui na obtenção de um produto final de melhor qualidade (Delgado & Sun, 2001).

Woinet et al. (1998a,b) apresentaram uma metodologia para analisar o tamanho e a localização dos cristais de gelo formados no interior de um produto alimentício congelado (*gelatin gel*). A metodologia proposta consiste, basicamente, em (a) congelar o produto (b) sublimar a água congelada e por fim (c) analisar a massa porosa resultante, por meio de um analisador de imagens.

Em suas pesquisas, Chevalier et al. (2000a) apresentaram a conformação dos cristais de gelo num produto alimentício congelado por meio de um fluxo de ar à -30°C . Pela Figura 2.4 nota-se claramente a influência do fluxo de calor na formação dos cristais de gelo no interior do material.

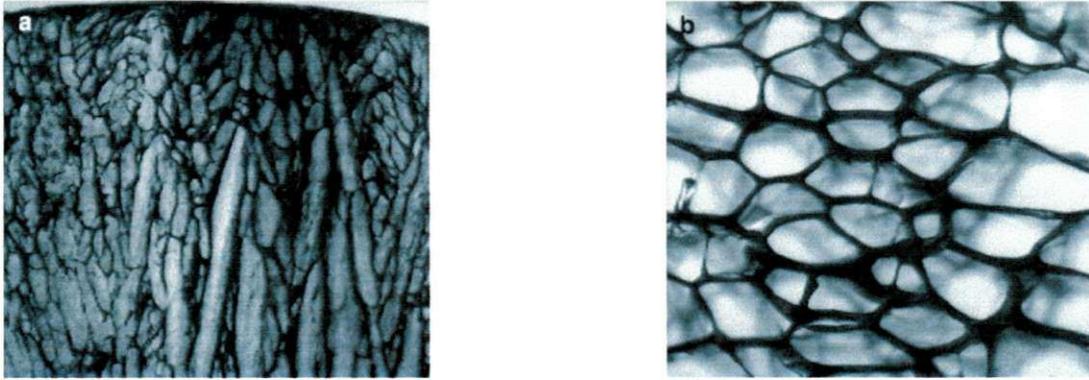


Figura 2.4. Estrutura dos cristais de gelo no interior de um produto alimentício (*gelatin gel*). (a) corte paralelo ao fluxo de calor (6,4 x); (b) corte perpendicular ao fluxo de calor no centro do material (80 x). Fonte: Chevalier et al. (2000a)

A experiência mostra que a qualidade dos produtos congelados depende fortemente da taxa, ou seja, da velocidade de congelamento (Ramaswamy & Tung, 1984; Lan & Farid, 2004). Num congelamento lento geralmente ocorre a formação de cristais de gelo pontiagudos, exclusivamente em áreas extracelulares do produto, enquanto que, uma alta taxa de congelamento provoca a formação de pequenos cristais de gelo uniformemente distribuídos por todo tecido celular.

Segundo Sanz et al. (1999), durante o congelamento de produtos alimentícios, existe um grande risco de danos causados pela formação dos cristais de gelo, que afetam as paredes celulares destruindo a estrutura dos tecidos. Neste mesmo trabalho, os autores apresentam uma modelagem matemática para simulação do processo com diferentes taxas de congelamento visando aumentar a qualidade do produto final.

Chevalier et al. (2000b) e Songming et al. (2005) afirmam que o congelamento pressurizado é uma alternativa para diminuir os danos causados durante o congelamento. O processo de congelamento pressurizado (*Pressure-shift freezing*) é dividido, basicamente, em três etapas: (a) a amostra é pressurizada; (b) resfriamento à pressão constante (valores superiores a 1 atm) até o início do congelamento (sub-resfriamento induzido); (c) a pressão é reduzida rapidamente causando a nucleação simultânea em toda amostra. Com este procedimento, cria-se uma fina e homogênea nucleação e, conseqüentemente, a formação de pequenos cristais de gelo distribuídos em toda amostra (Figura 2.5).

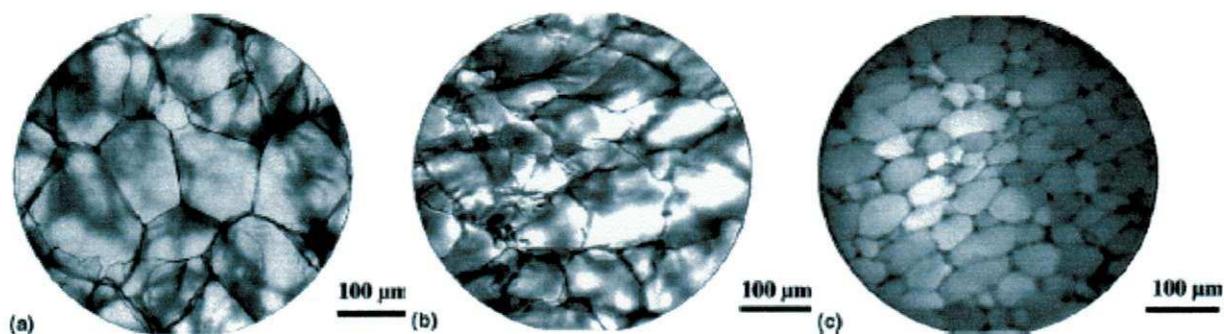


Figura 2.5. Microestrutura de um produto alimentício (*gelatin gel*) congelado à diferentes pressões. (a) 100 MPa (-8,4° C); (b) 150 MPa (-14° C); (c) 200 MPa (-20° C). Fonte: Songming et al. (2005)

2.2.5 Perda peso durante o resfriamento

O congelamento de produtos alimentícios por meio de um fluxo de ar, apesar de ser um dos métodos que melhor conserva as qualidades do produto, pode conduzir a uma desidratação ou perda de água que pode levar à perda de qualidade e conseqüentemente a perdas econômicas.

Durante o resfriamento de produtos alimentícios pode haver perda ou ganho de água. Essa transferência de água deve ser minimizada com a finalidade de manter a qualidade do produto (Hallstrom, citado por Delgado & Sun, 2001). A desidratação pode ser influenciada pelo produto, pelo tipo de sistema refrigeração e pelas condições operacionais do processo de resfriamento. As perdas por desidratação durante o processo variam de 1,5 a 2,3% em peso do material (Gigiél & Collet, 1989).

O resfriamento de produtos alimentícios por meio de um fluxo de ar, envolve transferência de calor por convecção e evaporação na superfície e por condução no interior do material. O efeito do resfriamento evaporativo pode afetar significativamente a taxa de resfriamento quando comparado apenas com o efeito da convecção (Chuntranuluck et al., 1998a-b-c).

Em geral, a perda de água por evaporação é maior durante o período de resfriamento. A taxa de transferência de massa é reduzida à medida que o produto vai congelando. Altas

temperaturas iniciais do material causam grandes perdas por desidratação. Como a desidratação está relacionada com a eficiência da transferência de calor, a razão (área superficial)/(massa) torna-se importante. Quanto mais peso por unidade de área de um determinado material, menores serão as perdas por desidratação durante processo de resfriamento. A temperatura a velocidade e a turbulência do meio refrigerante também influenciam na desidratação (Delgado & Sun, 2001).

Por fim, embora o congelamento seja um dos métodos de conservação menos danoso aos produtos alimentícios, poderá haver alguma desidratação (perda d'água) durante o processo, acarretando perda na qualidade e, portanto, perdas econômicas (Kuitche et al., 1996; Chuntranuluk et al., 1998a,b,c; Briley, 2002). Com isso, a transferência de água do produto deve ser minimizada para manter a qualidade até o final do processo. Desde que no período de resfriamento, as temperaturas no interior do sólido são maiores, a perda de água por evaporação, neste período é maior. Isto pode ser minimizado resfriando o material com ar a baixa temperatura e elevada umidade relativa.

2.2.6 Teor de umidade inicial

O teor de umidade inicial do produto influencia fortemente na cinética de diminuição de temperatura, principalmente na região em que ocorre o congelamento propriamente dito. Quanto menor for o teor de umidade inicial do produto, é possível que o tempo de congelamento (mudança de fase) seja, também, reduzido.

Além da alteração no tempo de processamento, o teor de água inicial, no caso de batata frita à francesa, também é um fator determinante da textura do produto final obtido (Montague et al., 2003).

Experiências mostram que a quantidade de água do material influencia no valor de suas propriedades termofísicas. Wang & Brennan (1995) determinaram, para batatas, valores experimentais de densidade em função do teor de umidade. Os autores observaram que a densidade decresce com o aumento do teor de umidade. Um modelo matemático exponencial foi ajustado aos dados experimentais por meio de uma regressão não-linear e um bom ajuste foi obtido.

Rahman (1992) e Wang & Brennan (1992) determinaram valores experimentais de condutividade térmica para batatas em função do teor de umidade. A condutividade térmica aumentou com o aumento do teor de umidade do material. Uma equação matemática logarítmica proposta por Wang & Brennan (1992) foi ajustada, com boa precisão, aos dados experimentais.

Valores de calor específico da batata, para vários teores de umidade, foram determinados por Wang & Brennan (1993). Os autores concluíram que o calor específico aumenta linearmente com o teor de umidade.

2.3 Modelagem matemática do processo

As ferramentas disponíveis para resolução de um determinado problema físico, são basicamente os métodos analíticos, métodos numéricos e experimentação em laboratório.

Segundo Maliska (1995), os métodos analíticos e numéricos formam a classe dos métodos teóricos, pois ambos objetivam resolver equações diferenciais. A diferença está na complexidade da equação que cada método pode atacar. Os métodos analíticos, apesar de apresentarem uma série de restrições e simplificações, não devem ser descartados, pois uma de suas importantes aplicações é validar casos limites de modelos numéricos e também auxiliar no desenvolvimento de métodos numéricos mais eficientes.

A experimentação numérica (métodos numéricos) praticamente não apresenta restrições, podendo ser utilizada para resolver problemas com complicadas condições de contorno, definidos em geometrias arbitrárias, gerando resultados com uma rapidez considerável. A comparação dos resultados numéricos com os resultados analíticos (ou com outros resultados numéricos), caracteriza a validação numérica. Por outro lado, a comparação de resultados numéricos com os resultados experimentais, identifica a validação física.

A experimentação em laboratório, por sua vez, tem a grande vantagem de tratar o fenômeno físico em sua configuração real, sendo recomendada sempre que possível. No entanto, ela apresenta alguns inconvenientes como os custos envolvidos, dificuldade de reprodução de condições reais, dentre outros. Porém, na ausência de modelos matemáticos

estabelecidos e em geometrias extremamente complexas, muitas vezes esta é a única alternativa que se dispõe.

2.3.1 Métodos analíticos e empíricos

Durante o fenômeno de congelamento, ocorre a liberação do calor latente de solidificação do produto. Quando se trata uma substância pura, o congelamento ocorre a uma temperatura constante, porém, no caso de substâncias complexas a solidificação ocorre numa faixa de temperatura.

Vários autores têm apresentado modelos matemáticos analíticos e/ou empíricos para calcular o tempo decorrido durante o congelamento de materiais biológicos. Estes modelos são, geralmente, agrupados em duas categorias: (a) todo calor latente é removido durante o congelamento à temperatura constante e (b) o calor latente é removido numa faixa de temperatura.

A primeira categoria divide-se em duas classes: que fornecem soluções exatas ou soluções aproximadas da equação de Fourier (LeBlanc et al., 1990b; Delgado & Sun, 2001).

A segunda categoria também se divide em duas classes: modelos aproximados (LeBlanc et al., 1990b; Pham, 1985;) ou empíricos (LeBlanc et al., 1990b; Cleland & Earle, 1982; Salvadori et al., 1987).

Ferreira (2000) e Silva (2002) utilizaram a solução analítica da equação de Fourier em coordenadas esféricas e cartesianas, para calcular a difusividade térmica durante as fases de resfriamento, congelamento e pós-congelamento de frutos de umbu e cajá, respectivamente. Nestes trabalhos, os autores não levaram em consideração o calor latente de solidificação liberado durante a mudança de fase da água contida no produto.

Várias formulações analíticas para predição do tempo de congelamento e descongelamento de produtos alimentícios, tomando como referência a equação de Planck, podem ser encontradas em Lopéz & Hallstrom (2003).

Em geral, todos os modelos reportados pelos autores acima, apresentam uma série de considerações e aproximações que acabam por restringir sua aplicação em problemas com geometrias irregulares, propriedades termofísicas variáveis e, principalmente, geração interna de energia durante o processo. O que requer estudos mais sofisticados e completos.

2.3.2 Métodos numéricos

Os fenômenos físicos, em geral, podem ser descritos por um sistema de equações diferenciais ordinárias ou parciais com apropriadas condições iniciais e de contorno, válidas para uma região ou domínio específico.

Os métodos numéricos são bastante utilizados na modelagem matemática da transferência de calor e massa durante o congelamento de produtos alimentícios. A vantagem da utilização dos métodos numéricos em relação às equações simples é a possibilidade de considerar fatores como: mudança de fase, que ocorre numa faixa de temperatura; propriedades termofísicas variáveis, e também, a heterogeneidade do produto. Desde que sejam bem formulados e implementados corretamente, os métodos numéricos apresentam resultados versáteis e confiáveis, quando aplicados à predição do tempo de congelamento e descongelamento de materiais biológicos (Hossain et al., 1992).

A equação de difusão de calor durante o processo de congelamento de materiais biológicos em geral, pode ser expressa de duas maneiras (Crespo, 1996; Agnelli & Mascheroni, 2001):

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho c_p T] = \nabla \cdot [k(T) \nabla T] \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [H] = \nabla \cdot [k(H) \nabla (T(H))] \quad (2.2)$$

onde T é a temperatura; ρ é a densidade; c_p é o calor específico; k é a condutividade térmica; H é a entalpia e t é o tempo de processo.

A Eq. (2.1) é a formulação em temperatura (método clássico) para transferência de calor. Nela a temperatura é a única variável dependente. A Eq. (2.2) é a formulação em entalpia para equação da conservação da energia. Neste tipo de formulação existem duas

variáveis dependentes, ou seja, a entalpia é a variável primária e a temperatura a variável secundária.

Segundo Alhama & Fernández (2002) cada uma das formulações possuem vantagens e desvantagens. Na formulação em temperatura, com tratamento explícito o incremento de tempo utilizado na resolução da equação deve ser pequeno o suficiente para evitar instabilidades causadas pelas variações no calor específico do material. Por outro lado, a formulação em entalpia requer o conhecimento da dependência da entalpia com a condutividade térmica e temperatura ao longo de todo processo.

Várias metodologias numéricas podem ser utilizadas para resolver as Eqs. (2.1) e (2.2), dentre eles, destacam-se: diferenças finitas, elementos finitos, elementos de contorno e volumes finitos (Patankar, 1980; Maliska, 1995; Fortuna, 2000; Versteeg & Malalasekera, 1995).

Segundo alguns autores, a grande vantagem da utilização da técnica dos volumes finitos na resolução das equações diferenciais que regem um determinado problema é que os fluxos da propriedade transportada (calor e massa) são conservativos em cada volume de controle do domínio físico (Moraga & Medina, 2000; Agnelli & Mascheroni, 2001; Moraga & Barraza, 2002).

Mannapperuma & Singh (1989) apresentam uma formulação em entalpia para o processo de transferência de calor com o objetivo de calcular o tempo de resfriamento e congelamento de produtos alimentícios com geometrias bi e tridimensionais. Foram consideradas como condições de contorno: temperatura prescrita, fluxo de calor prescrito e convecção térmica na superfície.

A importância de incorporar a desidratação superficial na modelagem matemática do resfriamento de produtos alimentícios é extensamente indicada e reconhecida (Kuitche et al., 1996; Chuntranuluk et al., 1998a,b,c; Briley, 2002). Isto porque, a perda da umidade na superfície do produto acelera não somente o processo de resfriamento, mas também modifica os atributos da qualidade de produto.

Na Tabela 2.1 encontram-se alguns métodos desenvolvidos, a técnica utilizada na resolução das equações de transferência de calor e massa (Eqs. (2.1) e (2.2)) bem como as condições durante o processo de resfriamento e congelamento de alguns materiais biológicos.

Tabela 2.1. Modelos de predição do tempo de congelamento e resfriamento

Referência	Técnica	Produto	Processo	Condições
Tocci & Mascheroni (1995)	Diferenças finitas (explícito)	Carne (produto esférico)	Resfriamento e armazenamento	Coefficientes de transferência de calor e massa corrigidos para incluir a desidratação na camada superficial
Agnelli & Mascheroni (2001)	Volumes finitos (explícito)	Hamburger, carne e morango	Resfriamento e congelamento	Congelamento foi dividido em duas partes: criogênico (poucos segundos) e convencional (fluxo de ar)
Moraga & Barraza (2002)	Volumes finitos (semi-implícito)	Embalagem de plástico contendo água, celulose e NaCl	Resfriamento e congelamento	Congelamento do material, por convecção natural, no interior de um freezer
Moraga & Medina (2000)	Volumes finitos (semi-implícito)	Salmon (placa plana)	Resfriamento e congelamento	Mecânica do fluido externo ao alimento e solidificação da água no interior do produto
Mallikarjunan & Mittal (1994)	Elementos finitos	Carcaça de carne	Resfriamento	Propriedades térmicas em função da temperatura
Hayakawa & Sucar (1982)*	Elementos finitos	Frutas e hortaliças (produtos esféricos)	Resfriamento	Geração de calor dependente da respiração, temperatura e tempo
Chau & Gaffney (1990)*	Diferenças finitas (explícito)	Frutas e hortaliças (produtos esféricos)	Resfriamento	Respiração e transpiração incluídas

*Autor citado por Delgado & Sun (2001)

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

O processo de resfriamento e congelamento de materiais biológicos é um excelente método físico de conservação, amplamente utilizado na indústria de alimentos. O controle de qualidade, a retenção de nutrientes e a durabilidade do produto armazenado são algumas das qualidades e/ou benefícios do congelamento. No entanto, dependendo da estrutura do material a ser congelado e do sistema de refrigeração utilizado, podem ocorrer sérios danos ao produto. A descrição matemática, juntamente com a solução da equação de difusão transiente, é uma importante ferramenta a ser utilizada para se estudar melhor o fenômeno. Desta forma, é possível obter alguns parâmetros essenciais de processo, tais como, distribuição de temperatura no interior do material, tempo de processo, coeficiente de condução e convecção térmica, difusividade térmica, dentre outros.

Vários estudos teóricos e experimentais para estimar os parâmetros de processo durante o resfriamento e congelamento têm sido reportados na literatura, contudo, os modelos matemáticos utilizados restringem-se a assumir geometrias regulares e/ou propriedades térmicas constantes. Neste contexto, apresenta-se por meio deste trabalho, uma modelagem matemática para predição do fenômeno de difusão transiente em sólidos paralelepípedos com geração interna de energia, com particular referência a resfriamento e congelamento de

produtos alimentícios. A solução numérica tridimensional para descrever a transferência de calor no interior do sólido, é desenvolvida, considerando propriedades termofísicas variáveis durante a mudança de fase e condições de contorno convectivas na superfície do sólido. Como aplicação, a metodologia foi utilizada para prever a cinética de resfriamento, congelamento e pós-congelamento de fatias de batatas pré-processadas.

3.1 O Problema físico

O problema físico a ser estudado é a transferência de calor tridimensional transiente e com geração interna de energia (durante o congelamento) num corpo sólido em forma de paralelepípedo (Figura 3.1).

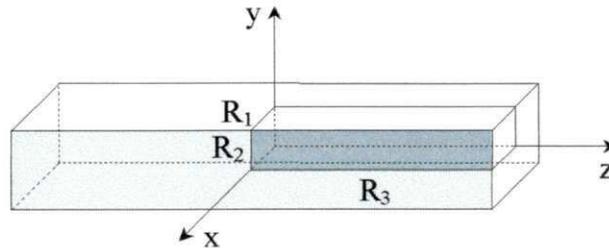


Figura 3.1. Esquema da configuração geométrica do problema físico

UFCG - BIBLIOTECA

3.2 Modelagem matemática

A equação diferencial geral de conservação pode ser escrita da seguinte forma (Maliska, 1995; Nascimento, 2002):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda \varphi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \varphi) + S \varphi \quad (3.1)$$

em que Γ , λ são propriedades de transporte; φ é a variável dependente; $S \varphi$ é o termo fonte ou de geração de energia e $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k}$ é um operador vetorial.

Considerando unicamente a transferência de calor durante o processo, tem-se que: $\lambda = \rho c_p$; $\varphi = T$; $\Gamma = k$ e $S = q'''$. Então a Eq. (3.1) pode ser reescrita como segue:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + q''' \quad (3.2)$$

em que ρ é a densidade; T é a temperatura; c_p é o calor específico; k é a condutividade térmica e q''' é o termo de geração de energia associado à mudança de fase.

Durante o congelamento, ocorre a mudança de fase da água do estado líquido para a fase gelo e há simultaneamente uma liberação de energia. O termo de geração de energia na Eq. (3.2) representa o calor liberado durante a mudança de fase do produto (Limeira, 2003) e pode ser obtido como segue:

$$q''' = \rho L_s \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3.3)$$

onde L_s é o calor latente de solidificação, $f_s = (T_L - T)/(T_L - T_s)$ representa a fração de sólido (gelo) formada durante a fase de congelamento, T_L é a temperatura de início de congelamento, T_s é a temperatura de fim do congelamento, e t é o tempo.

Neste caso, a equação de transferência de calor, incluindo geração de energia interna, aplicada para um sólido com forma de paralelepípedo (Figura 3.1) pode ser escrita como segue:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho L_s \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3.4)$$

O calor latente de solidificação é liberado durante a mudança de fase do produto. Assim sendo, tem-se que:

$$\begin{aligned} L_s &= 0 \quad \text{para } T > T_L && \text{(período de resfriamento)} \\ L_s &> 0 \quad \text{para } T_L > T > T_s && \text{(período de congelamento)} \\ L_s &= 0 \quad \text{para } T < T_s && \text{(período de pós-congelamento)} \end{aligned}$$

Devido à simetria existente na configuração geométrica do problema em questão, considera-se apenas 1/8 de seu volume no intuito de facilitar a abordagem e análise do problema. As condições: inicial, de simetria e de contorno consideradas foram:

a) Condição inicial: distribuição uniforme de temperatura em todo corpo.

$$T(x, y, z, t) = T_0, t = 0 \quad (3.5a)$$

b) Condição de simetria: fluxo de calor nulo nas regiões de simetria.

$$-k \frac{\partial T(x=0, y, z, t)}{\partial x} = 0, t > 0 \quad (3.5b)$$

$$-k \frac{\partial T(x, y=0, z, t)}{\partial y} = 0, t > 0 \quad (3.5c)$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z=0, t)}{\partial z} = 0, t > 0 \quad (3.5d)$$

c) Condição de contorno na superfície: transferência de calor por convecção.

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = h_c [T(x, y, z, t) - T_{eq}], x = R_1, t > 0 \quad (3.5e)$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} = h_c [T(x, y, z, t) - T_{eq}], y = R_2, t > 0 \quad (3.5f)$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} = h_c [T(x, y, z, t) - T_{eq}], z = R_3, t > 0 \quad (3.5g)$$

Nas Eqs. (3.5e-f-g), h_c e T_{eq} representam o coeficiente de convecção térmica na superfície livre do material e a temperatura do meio refrigerante, respectivamente.

Apresentada a modelagem matemática que governa o fenômeno físico, segue a metodologia numérica para solução do conjunto de equações diferenciais.

3.3 Metodologia numérica

Neste trabalho a equação diferencial governante, bem como as condições de contorno, são discretizadas utilizando a técnica dos volumes finitos. Na Figura 3.2 encontra-se

esquemático o volume de controle diferencial utilizado na discretização da equação governante.

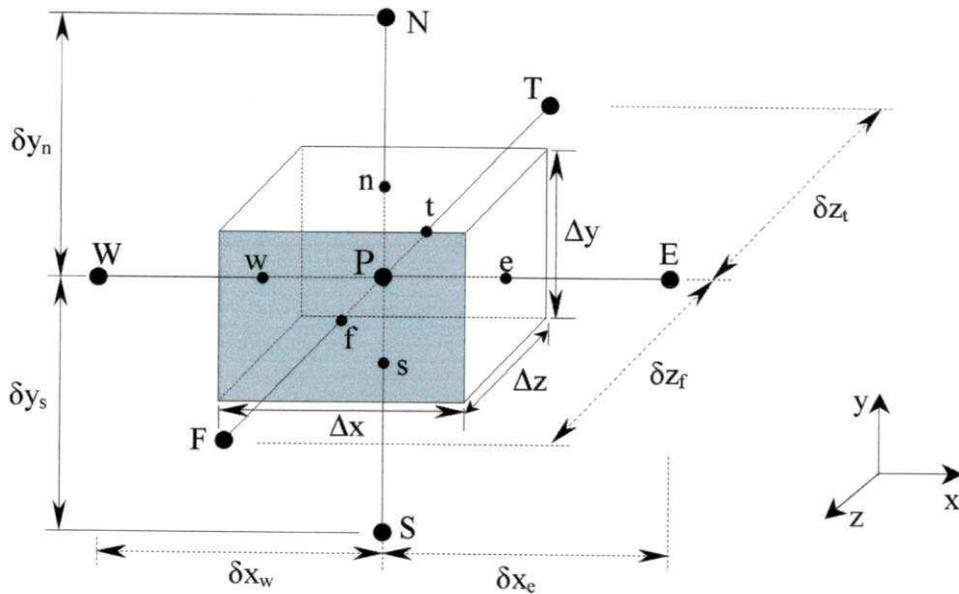


Figura 3.2. Volume de controle diferencial utilizado

Aplicando a integral em ambos os lados da Eq. (3.4), no espaço e no tempo, e rearranjando os termos, tem-se:

$$\int_V \int_t \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho_P \left(c_P + \frac{L_s}{T_L - T_S} \right) T \right] dt dV = \int_V \int_t \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dt dV + \int_V \int_t \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dt dV + \int_V \int_t \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dt dV \quad (3.6)$$

Realizando a integração da Eq. (3.6), tem-se:

$$\frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \left[\rho_P \left(c_P + \frac{L_s}{T_L - T_S} \right) T_P - \rho^o \left(c_P^o + \frac{L_s}{T_L - T_S} \right) T_P^o \right] = f \left(k_e \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - k_w \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w \right) \Delta y \Delta z + (1-f) \left(k_e \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - k_w \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w \right) \Delta y \Delta z +$$

UFCC - BIBLIOTECA

$$\begin{aligned}
& f \left(k_n \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - k_s \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s \right) \Delta x \Delta z + (1-f) \left(k_n \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - k_s \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n \right) \Delta x \Delta z + \\
& f \left(k_f \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_f - k_t \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_t \right) \Delta x \Delta y + (1-f) \left(k_f \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_f - k_t \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_t \right) \Delta x \Delta y
\end{aligned} \quad (3.7)$$

onde f representa o fator de interpolação temporal.

Como no problema em estudo os efeitos difusivos são dominantes, torna-se mais prático utilizar uma função linear como função de interpolação espacial entre os pontos nodais. Sendo assim, as derivadas diretas em relação ao fluxo difusivo, são dadas por:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e &= \frac{T_E - T_P}{\delta x_e} & \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w &= \frac{T_P - T_W}{\delta x_w} & \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n &= \frac{T_N - T_P}{\delta y_n} \\
\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s &= \frac{T_P - T_S}{\delta y_s} & \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_f &= \frac{T_F - T_P}{\delta z_f} & \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_t &= \frac{T_P - T_T}{\delta z_t}
\end{aligned}$$

Em relação ao tempo, todos os valores de T são determinados como uma função linear entre os instantes anterior e atual, sendo calculados por: $T_P = f T_P + (1-f) T_P^o$, em que f é um fator, cujo valor numérico encontra-se entre 0 e 1, caracterizado as formulações explícita se $f = 0$, implícita se $0 < f < 1$ e totalmente implícita quando $f = 1$ (Maliska, 1995).

Aplicando uma interpolação linear para aproximação espacial das derivadas e uma formulação totalmente implícita para interpolação em relação ao tempo, a Eq. (3.7) pode ser reescrita como segue:

$$\begin{aligned}
& \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \rho_P \left(c_P + \frac{L_s}{T_L - T_S} \right) T_P = \left[k_e \left(\frac{T_E - T_P}{\delta x_e} \right) - k_w \left(\frac{T_P - T_W}{\delta x_w} \right) \right] \Delta y \Delta z + \\
& \left[k_n \left(\frac{T_N - T_P}{\delta y_n} \right) - k_s \left(\frac{T_P - T_S}{\delta y_s} \right) \right] \Delta x \Delta z + \left[k_f \left(\frac{T_F - T_P}{\delta z_f} \right) - k_t \left(\frac{T_P - T_T}{\delta z_t} \right) \right] \Delta x \Delta y + \\
& \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \rho_P^o \left(c_P^o + \frac{L_s}{T_L - T_S} \right) T_P^o
\end{aligned} \quad (3.8)$$

Rearranjando os termos comuns da Eq. (3.8) e reescrevendo-a na forma algébrica aplicada ao ponto P (Figura 3.2), tem-se:

$$A_P T_P = A_E T_E + A_W T_W + A_N T_N + A_S T_S + A_F T_F + A_T T_T + A_P^0 T_P^0 + B T_{eq} \quad (3.9)$$

em que:

$$A_P = A_E + A_W + A_N + A_S + A_F + A_T + B + \rho_P \left(c_P + \frac{L_s}{T_L - T_S} \right) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t}$$

$$A_E = \frac{k_e}{\delta x_e} \Delta y \Delta z \quad A_W = \frac{k_w}{\delta x_w} \Delta y \Delta z \quad A_N = \frac{k_n}{\delta y_n} \Delta x \Delta z$$

$$A_S = \frac{k_s}{\delta y_s} \Delta x \Delta z \quad A_F = \frac{k_f}{\delta z_f} \Delta x \Delta y \quad A_T = \frac{k_t}{\delta z_t} \Delta x \Delta y$$

$$A_P^0 = \rho_P^0 \left(c_P^0 + \frac{L_s}{T_L - T_S} \right) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t}$$

Os termos da Eq. (3.9) possuem um significado físico importante. Os coeficientes A_E , A_W , A_N , A_S , A_F , A_T representam a condutância entre o ponto nodal P e seus vizinhos. O termo A_P^0 representa a influência da temperatura T no instante anterior, sobre o seu valor no instante atual.

A Eq. (3.9) é válida somente para os volumes interiores ao domínio físico, neste caso $B=0$. Os volumes de fronteira são tratados de maneira diferenciada incorporando as condições de contorno na formulação. Existem três tipos de condições de contorno possíveis: temperatura prescrita, fluxo de calor prescrito (panos de simetria) e convecção na superfície.

Como este trabalho trata da transferência de calor durante o resfriamento e congelamento por meio de um fluxo de ar frio, tem-se especificamente duas condições de contorno, que são, fluxo de calor prescrito, ocorrendo nos planos de simetria, e convecção na superfície.

Os planos de simetria não são considerados no conjunto de equações resolvidas. Após todo o sistema de equações ter sido resolvido, é feita uma estimativa da propriedade

transportada na interface do volume de controle. Em outras palavras, assume-se que o fluxo de calor que chega no ponto adjacente ao plano de simetria é igual ao fluxo que sai desse ponto. Sendo assim, para cada plano de simetria, tem-se:

- Plano $x = 0$ ($0 \leq y \leq R_2$) e ($0 \leq z \leq R_3$):

$$-k_w \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w = -k_e \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_e \quad (3.10)$$

Na forma discretizada:

$$-k_w \left(\frac{T_P - T_w}{\delta x_w} \right) = -k_e \left(\frac{T_E - T_P}{\delta x_e} \right) \quad (3.11)$$

ou ainda:

$$T_W = \left(\frac{k_e \delta x_w}{k_w \delta x_e} + 1 \right) T_P - \frac{k_e \delta x_w}{k_w \delta x_e} T_E \quad (3.12)$$

- Plano $y = 0$ ($0 \leq x \leq R_1$) e ($0 \leq z \leq R_3$):

$$-k_n \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_n = -k_s \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_s \quad (3.13)$$

Na forma discretizada:

$$-k_s \left(\frac{T_P - T_S}{\delta y_s} \right) = -k_n \left(\frac{T_N - T_P}{\delta y_n} \right) \quad (3.14)$$

ou ainda:

UFCC - BIBLIOTECA

$$T_S = \left(\frac{k_n}{k_s} \frac{\delta y_s}{\delta y_n} + 1 \right) T_P - \frac{k_n}{k_s} \frac{\delta y_s}{\delta y_n} T_N \quad (3.15)$$

• Plano $z = 0$ ($0 \leq x \leq R_1$) e ($0 \leq y \leq R_2$):

$$-k_f \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_t = -k_t \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_f \quad (3.16)$$

Na forma discretizada:

$$-k_t \left(\frac{T_P - T_T}{\delta z_t} \right) = -k_f \left(\frac{T_F - T_P}{\delta z_f} \right) \quad (3.17)$$

ou ainda:

$$T_T = \left(\frac{k_f}{k_t} \frac{\delta z_t}{\delta z_f} + 1 \right) T_P - \frac{k_f}{k_t} \frac{\delta z_t}{\delta z_f} T_F \quad (3.18)$$

A condição de contorno na superfície livre do material é obtida assumindo que o fluxo difusivo é igual ao fluxo convectivo de calor, conforme apresentado nas Eqs. (3.5e-f-g). Neste caso tem-se que:

$$-k_e \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e = -k_e \frac{T(R_1, y, z, t) - T_P}{\delta x_e} = h_c [T(R_1, y, z, t) - T_{eq}] \quad (3.19a)$$

$$-k_n \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n = -k_n \frac{T(x, R_2, z, t) - T_P}{\delta y_n} = h_c [T(x, R_2, z, t) - T_{eq}] \quad (3.19b)$$

$$-k_f \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_f = -k_f \frac{T(x, y, R_3, t) - T_P}{\delta z_f} = h_c [T(x, y, R_3, t) - T_{eq}] \quad (3.19c)$$

(I)

(II)

(III)

Isolando-se $T(R_1, y, z, t)$, $T(x, R_2, z, t)$ e $T(x, y, R_3)$ por meio das respectivas igualdades dos termos (II) e (III) nas Eqs. (3.19a-b-c), e substituindo no termo (II), tem-se, respectivamente:

$$-k_e \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_e = \frac{T_P - T_{eq}}{\left(\frac{1}{h_c} + \frac{\delta x_e}{k_e} \right)} \quad (3.20a)$$

$$-k_n \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_n = \frac{T_P - T_{eq}}{\left(\frac{1}{h_c} + \frac{\delta y_n}{k_n} \right)} \quad (3.20b)$$

$$-k_f \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_f = \frac{T_P - T_{eq}}{\left(\frac{1}{h_c} + \frac{\delta z_f}{k_f} \right)} \quad (3.20c)$$

Substituindo as Eqs. (3.20a-b-c) na Eq. (3.8), aplicada a cada superfície livre do sólido, rearranjando os termos, tem-se a Eq. (3.9), sendo os coeficientes A_W , A_T , A_S e A_P^0 iguais aos apresentados anteriormente. Os demais coeficientes são apresentados a seguir:

$$A_E = \begin{cases} 0 & \text{para os volumes de fronteira} \\ \frac{k_e}{\delta x_e} \Delta y \Delta z & \text{para os volumes internos} \end{cases}$$

$$A_N = \begin{cases} 0 & \text{para os volumes de fronteira} \\ \frac{k_n}{\delta y_n} \Delta x \Delta z & \text{para os volumes internos} \end{cases}$$

$$A_F = \begin{cases} 0 & \text{para os volumes de fronteira} \\ \frac{k_f}{\delta z_f} \Delta x \Delta z & \text{para os volumes internos} \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 0 & \text{para os volumes internos} \\ \frac{\Delta y \Delta z}{\left(\frac{1}{h_c} + \frac{\delta x_e}{k_e} \right)} & \text{para os volumes de fronteira na} \\ & \text{face perpendicular ao eixo x} \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 0 & \text{para os volumes internos} \\ \frac{\Delta x \Delta z}{\left(\frac{1}{h_c} + \frac{\delta y_n}{k_n}\right)} & \text{para os volumes de fronteira na} \\ & \text{face perpendicular ao eixo y} \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 0 & \text{para os volumes internos} \\ \frac{\Delta x \Delta y}{\left(\frac{1}{h_c} + \frac{\delta z_f}{k_f}\right)} & \text{para os volumes de fronteira na} \\ & \text{face perpendicular ao eixo z} \end{cases}$$

O coeficiente B é associado aos termos convectivos na superfície do material e é adicionado na formulação matemática, sendo aplicado aos pontos nodais pertencentes à fronteira do sólido.

Para calcular o valor da propriedade k (condutividade térmica) nas interfaces do volume de controle (Figura 3.2) assume-se uma variação de k entre o ponto P e seus vizinhos em qualquer direção (E, W, F, T, N, S), como segue (Patankar, 1980):

$$k_i = \left(\frac{1 - \hat{f}_i}{k_P} - \frac{\hat{f}_i}{k_E} \right) \tag{3.21}$$

em que \hat{f}_i é o fator de interpolação, dado por $\hat{f}_i = \frac{\delta d_{i+}}{\delta d_{i-}}$.

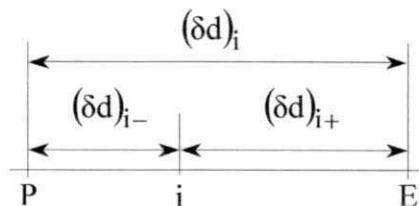


Figura 3.3. Posição da propriedade k na interface i entre os pontos P e E

No caso de uma malha uniforme, a interface está localizada no ponto médio entre os pontos P e E. Neste caso, o valor de $\hat{f}_i = 0,5$ e portanto, k é calculado pela média harmônica de k_E e k_P , ou seja:

$$k_i = \frac{2k_p k_E}{k_p + k_E} \quad (3.22)$$

Este tipo de formulação é fisicamente realista, uma vez que se k_p ou k_E forem zero, não haverá fluxo de calor e o valor da propriedade na interface, logicamente, será nulo.

Durante a mudança de fase foram propostas as seguintes equações para a condutividade térmica, calor específico e massa específica, respectivamente, em qualquer ponto no interior do produto:

$$k_{dc} = f_s k_{ac} + (1 - f_s) k_{pc} \quad (3.23a)$$

$$c_{Pdc} = f_s c_{Pac} + (1 - f_s) c_{Ppc} \quad (3.23b)$$

$$\rho_{dc} = f_s \rho_{ac} + (1 - f_s) \rho_{pc} \quad (3.23c)$$

onde os índices ac, dc e pc representam antes, durante e depois do congelamento, respectivamente. Desde que a fração de cristais de gelo (f_s) formada é variável neste período, a condutividade térmica e os demais parâmetros térmicos também o são.

Foi utilizada uma malha regular em coordenadas cartesianas para resolver o problema transiente tridimensional de transferência de calor com geração de energia. A posição dos pontos nodais no interior do domínio físico foi obtida da seguinte maneira:

$$x_i = y_i = z_i = 0, \quad \text{para } i = 1;$$

$$x_i = \frac{\Delta x}{2}, \quad \text{para } i = 2;$$

$$y_i = \frac{\Delta y}{2}, \quad \text{para } j = 2;$$

$$z_i = \frac{\Delta z}{2}, \quad \text{para } k = 2;$$

$$x_i = x_{i-1} + \frac{\Delta x}{2}, \quad \text{para } i = 3, \dots, npx - 1; \quad x_i = R_1, \quad \text{para } i = npx;$$

$$\begin{aligned}
 y_j &= y_{j-1} + \frac{\Delta y}{2}, & \text{para } j = 3, \dots, \text{np}y - 1; & & y_j &= R_2, & \text{para } j = \text{np}y; \\
 z_k &= z_{k-1} + \frac{\Delta z}{2}, & \text{para } k = 3, \dots, \text{np}z - 1; & & z_k &= R_3, & \text{para } k = \text{np}z;
 \end{aligned}$$

onde $\text{np}x$, $\text{np}y$ e $\text{np}z$ são os números de pontos nodais nas direções x , y , e z , respectivamente.

Com a finalidade resolver o sistema de equações gerado pela aplicação da Eq. (3.9) a todos os pontos do domínio físico, foi adaptado um código computacional, escrito no ambiente do *software* MATHEMATICA[®], desenvolvido por Nascimento (2002).

O sistema de equações foi resolvido por meio do método iterativo Gauss-Siedel. O critério de convergência utilizado, num certo instante de tempo foi: $|T^{n+1} - T^n| \leq 10^{-8}$, em que n representa a n -ésima iteração em cada instante de tempo. Utilizou-se uma malha de $20 \times 20 \times 20$ pontos nodais e um $\Delta t = 0,5$ s. Detalhes sobre a validação da solução numérica e refino de malha e tempo (sem mudança de fase) podem ser encontrados em Nascimento (2002). A técnica de ajuste dos dados numéricos aos dados experimentais utilizada no presente trabalho foi desenvolvida por Lima (1999) e será discutida posteriormente. Um fluxograma de operação do programa computacional é apresentado na forma de diagrama de blocos na Figura 3.4.

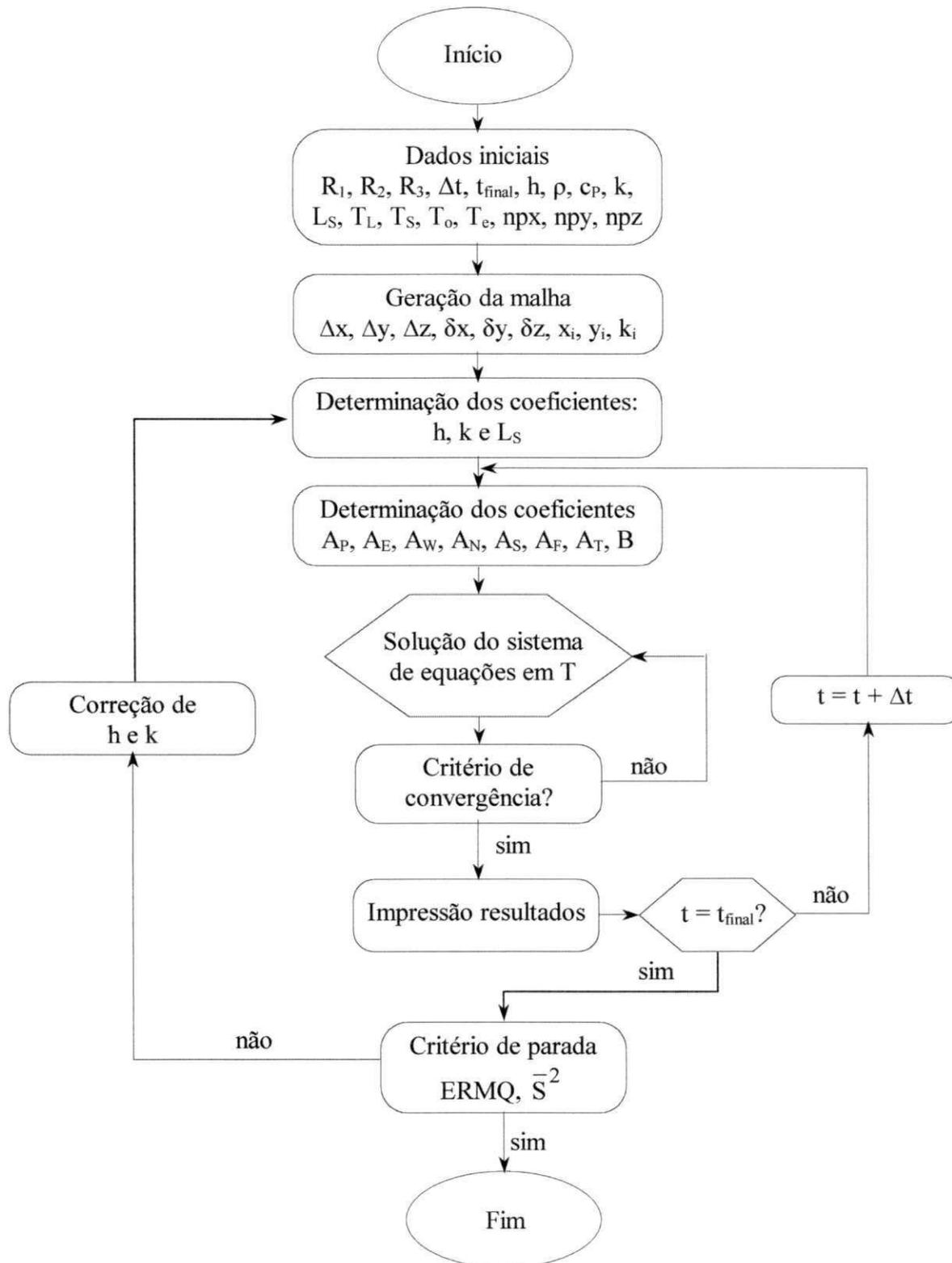


Figura 3.4. Fluxograma do código computacional implementado

3.4 Aplicações

3.4.1 Ajuste do modelo aos dados experimentais

Como aplicação, a metodologia foi utilizada para prever a cinética de resfriamento, congelamento e pós-congelamento de fatias de batatas pré-processadas. Os dados obtidos numericamente foram comparados a dados experimentais oriundos da literatura a fim de validar fisicamente o modelamento matemático. Os dados experimentais utilizados neste trabalho foram determinados por LeBlanc et al. (1990a). Os autores realizaram experimentos tal como acontece num processo industrial (Figura 3.5).

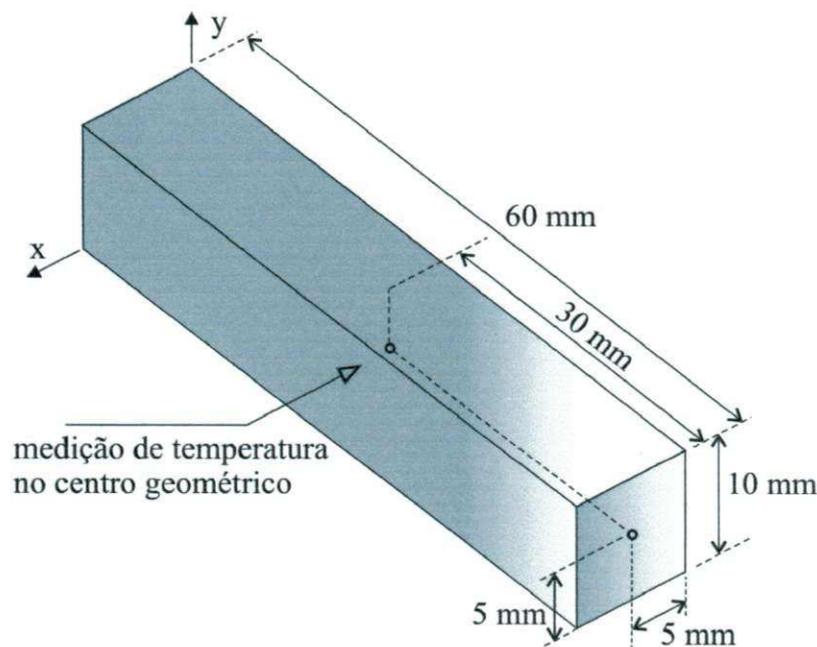


Figura 3.5. Esquema de uma fatia de batata pré-processada mostrando o local de medição de temperatura. Fonte: LeBlanc et al. (1990a)

Neste experimento, os autores utilizaram um fluxo de ar a -29°C com uma velocidade média de $0,5\text{ m s}^{-1}$. Os dados de temperatura foram coletados no centro do produto durante os processos de resfriamento, congelamento e pós-congelamento. Os seguintes dados foram incorporados ao modelo matemático e usados nas simulações (LeBlanc et al., 1990b):

$$\text{Calor específico, } c_p \begin{cases} 1870,0 \text{ J (kg } ^{\circ}\text{C)}^{-1} & \text{produto congelado} \\ 3420,0 \text{ J (kg } ^{\circ}\text{C)}^{-1} & \text{produto descongelado} \end{cases}$$

Desidade, ρ	$\left\{ \begin{array}{l} 1020,0 \text{ kg m}^{-3} \\ 1069,0 \text{ kg m}^{-3} \end{array} \right.$	produto congelado produto descongelado		
$R_1 = 5,0 \text{ mm}$	$R_2 = 5,0 \text{ mm}$	$R_3 = 30,0 \text{ mm}$		
$T_L = -0,80^\circ \text{ C}$	$t_L = 313,0 \text{ s.}$		Início congelamento	
$T_S = -5,40^\circ \text{ C}$	$t_S = 978,0 \text{ s.}$		Fim congelamento	
$T_F = -18,0^\circ \text{ C}$	$t_F = 1188,0 \text{ s.}$		Final do processo	
$T_o = 31,1^\circ \text{ C}$	$U_o = 73,72 \text{ \%b.u.}$	$L_S = 246888,0 \text{ J kg}^{-1}$	$v_{ar} = 0,5 \text{ m s}^{-1}$	

Os dados numéricos obtidos foram ajustados aos dados experimentais de temperatura no centro do sólido, no início do processo, no início e no fim do congelamento, e no final do processo, utilizando-se a técnica do erro quadrático mínimo (Eq. 3.24a-b) visando a obtenção dos coeficientes de condução e convecção do material biológico em estudo:

$$\text{ERMQ} = \sum_{i=1}^n (T_{i,\text{num}} - T_{i,\text{exp}})^2 \quad (3.24a)$$

$$\hat{S}^2 = \frac{\text{ERMQ}}{n - \hat{n}} \quad (3.24b)$$

onde n é o número de dados experimentais e \hat{n} é o número de parâmetros ajustados.

3.4.2 Simulação para várias dimensões do produto

Nesta etapa do trabalho o programa foi usado com a finalidade de avaliar a influência das dimensões da batata fatiada, no tempo total de processo. As dimensões utilizadas foram 10x10x10 mm, 10x10x20 mm e 10x10x30 mm. Todos os demais parâmetros utilizados foram os já apresentados no item 3.4.1.

3.4.3 Simulação para vários teores de umidade inicial do produto

O teor de umidade inicial é um importante parâmetro a ser considerado na indústria de processamento de batata, influenciando diretamente nas características finais do produto processado. A finalidade desta simulação foi procurar identificar as variações no tempo de processo quando se tem uma variação no teor de umidade inicial do produto. Para tanto, torna-se necessário o conhecimento das propriedades termofísicas como função do teor de água para batata. Na Tabela 3.1 encontram-se as propriedades termofísicas para o produto congelado e descongelado.

Tabela 3.1. Dados utilizados na simulação de congelamento de batata para vários teores de umidade inicial

U_0 % b.u.		c_p^a , $J(kg^\circ C)^{-1}$	ρ^b , $kg\ m^{-3}$	k^c , $W(m^\circ C)^{-1}$	L_S^* , Jkg^{-1}	$\alpha^{**}=k/(\rho c_p)$ $(\times 10^{-8},\ m^2 s^{-1})$
20,0	produto congelado	1173,28 ^d	1300,60 ^e	0,1280 ^f	66980,0	8,3881
	produto descongelado	2148,87	1373,97	0,0615		2,0829
30,0	produto congelado	1249,20 ^d	1289,85 ^e	0,2870 ^f	100470,0	17,8110
	produto descongelado	2287,92	1362,62	0,1380		4,4265
40,0	produto congelado	1344,78 ^d	1268,11 ^e	0,4187 ^f	133960,0	24,5520
	produto descongelado	2462,98	1339,65	0,2012		6,0978
50,0	produto congelado	1467,76 ^d	1227,51 ^e	0,5390 ^f	167450,0	29,9160
	produto descongelado	2688,22	1296,76	0,2590		7,4297

^a Wang & Brennan (1993); ^b Wang & Brennan (1995); ^c Wang & Brennan (1992)

^d 0,546 do produto descongelado; ^e 0,9466 do produto descongelado; ^f 2,0813 do produto descongelado

* $L_S = l_0 U_0$, onde $L_0 = 334900,0\ J/kg$ é o calor latente de solidificação da água pura (LeBlanc et al., 1990b)

** Difusividade térmica do material

Todos os parâmetros de processo (exceto U_0 , c_p , k e L_S) apresentados no item 3.4.1 foram usados nas simulações.

Os valores das propriedades para o produto congelado apresentados na Tabela 3.1 foram calculados com a mesma proporção existente entre as propriedades da água pura líquida e sólida.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O problema de transferência de calor durante o processo do resfriamento e congelamento de produtos alimentícios é um fenômeno de difícil predição por causa da natureza não-linear da equação de difusão. Estas não-linearidades são geradas pela forte dependência das propriedades termofísicas com a temperatura e, também, pela mudança de fase da água no interior do material. Devido a estas particularidades do processo, uma abordagem numérica mais abrangente do problema deve ser adotada.

Neste sentido, serão apresentados e discutidos os resultados da solução numérica do problema, ajustada a dados experimentais de congelamento de materiais biológicos, particularmente, dados de resfriamento e congelamento de fatias de batatas pré-processadas.

4.1 Validação da metodologia

Para validar a solução numérica apresentada no Capítulo 3, temperaturas no centro do produto durante o processo de resfriamento, congelamento e pós-congelamento são comparadas a dados experimentais reportados na literatura (LeBlanc et al., 1990a) e mostradas na Figura 4.1. Verificou-se, claramente, três períodos distintos no processo de decréscimo de temperatura: um período de resfriamento, em que o material é resfriado desde a

sua temperatura inicial até a temperatura de início de congelamento; um período de mudança de fase, onde ocorre a cristalização (solidificação) da água livre contida no produto; e, por fim, o período de têmpera (pós-congelamento) em que o produto alcança a temperatura final do processo, previamente estabelecida.

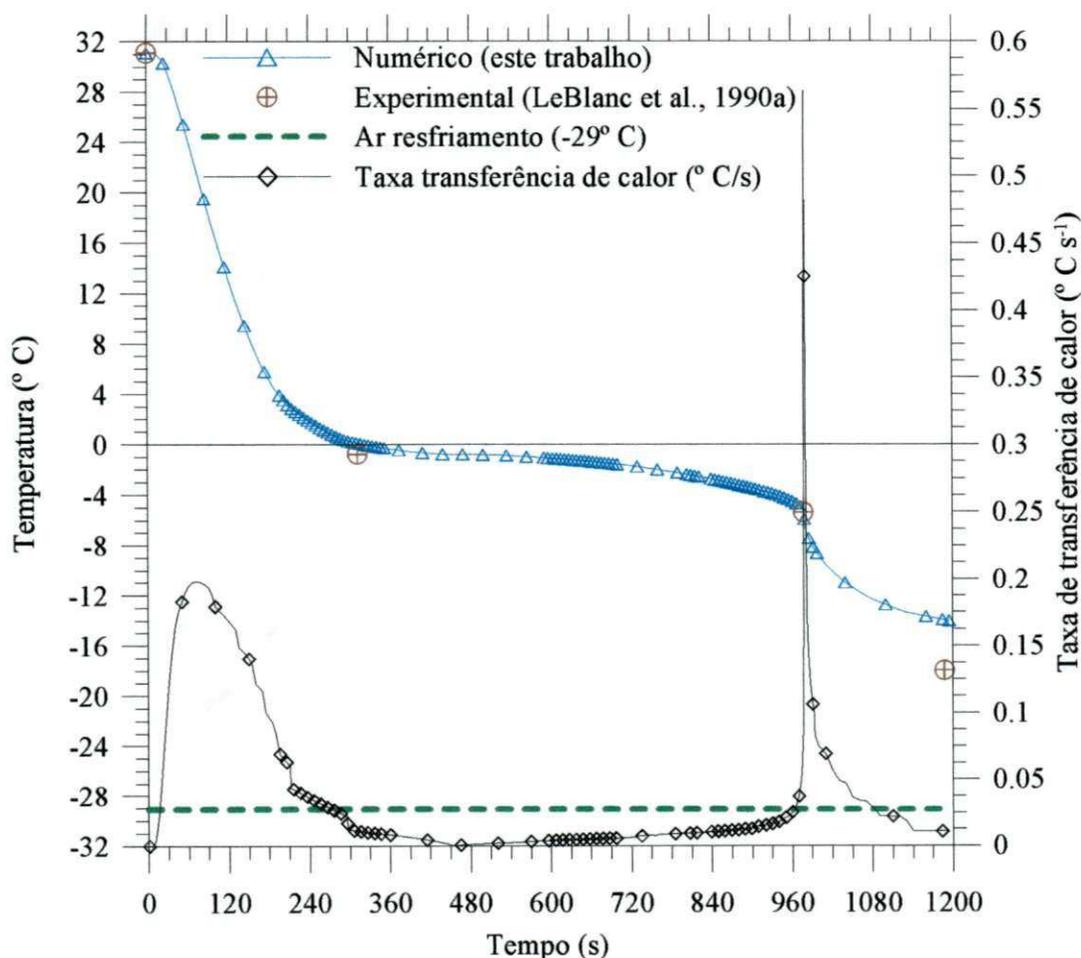


Figura 4.1. Valores experimentais e numéricos durante o processo de transferência de calor com mudança de fase ($U_o=72,73$ %b.u.)

A taxa de transferência de calor ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$) foi calculada numericamente (no centro do sólido) durante todo o processo de resfriamento e congelamento (Figura 4.1). O aumento da taxa, verificado no período de resfriamento, ocorre devido à acomodação térmica do material na fase inicial do processo. No início da solidificação, a taxa de resfriamento cai significativamente, tendendo para um valor próximo de zero, identificando o início da nucleação do gelo. A partir deste ponto, a taxa permanece aproximadamente constante até a solidificação completa da água livre existente no material. O final do processo de mudança de fase foi caracterizado por um aumento brusco no valor da taxa. Estes resultados estão em

concordância com os resultados experimentais obtidos por Rhaman et al. (2002). Portanto, por meio do valor numérico da taxa de resfriamento, torna-se possível obter os tempos e temperaturas de início e fim do processo de mudança de fase.

Analisando, ainda, a Figura 4.1, observa-se que a taxa de resfriamento no período de pré-congelamento é maior do que no período de pós-congelamento (exceto no instante de início do pós-congelamento), e muito maior que no período de congelamento propriamente dito. Isto se deve ao fato de que no início do processo existe uma grande diferença entre as temperaturas do material e do fluido refrigerante. No início do período de pós-congelamento a condutividade térmica é aproximadamente duas vezes a da água na fase líquida, o que resulta numa alta taxa de resfriamento neste instante do processo.

Ainda em relação à Figura 4.1, a comparação dos dados numéricos aos dados experimentais permite afirmar que um bom ajuste foi obtido, apresentando um erro quadrático mínimo (ERQM) de $0,0046 \text{ (}^\circ\text{C)}^2$ e uma variância (\bar{S}^2) de 0,0028. Por meio desta técnica de ajuste foram determinadas as condutividades térmicas do material: $0,47 \text{ W (m }^\circ\text{C)}^{-1}$ para o produto descongelado e de $0,98 \text{ W (m }^\circ\text{C)}^{-1}$ para o produto congelado. No período de congelamento (mudança de fase), a condutividade térmica da mistura é uma combinação linear destes dois valores, aliada a fração de sólido formada no interior do material. O coeficiente de transferência de calor na superfície foi de $52,0 \text{ W (m }^\circ\text{C)}^{-1}$ para uma velocidade do fluido refrigerante de $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Na Tabela 4.1 encontram-se alguns valores de condutividade térmica determinados para batata, reportados na literatura, considerando as condições de temperatura e teor de umidade. Nota-se que os valores de condutividade térmica para batata, reportados na literatura, encontram-se próximos dos valores numéricos obtidos neste trabalho. A concordância dos resultados caracteriza a validação física da modelagem matemática ora apresentada.

Nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, tem-se a distribuição bidimensional de temperatura do material no seu centro (planos $y=0$ e $z=0$), num plano intermediário (planos $y=R_2/2=0,0025\text{m}$ e $z=R_3/2=0,015\text{m}$) e na superfície (planos $y=R_2=0,005\text{m}$ e $z=R_3=0,03\text{m}$), respectivamente. As linhas tracejadas representam a região do sólido onde coexistem gelo e água (faixa de temperatura de $-0,8$ a $-5,4^\circ \text{C}$), enquanto que, as linhas pontilhadas é a região onde toda a água livre contida no material encontra-se completamente congelada (temperaturas inferiores a $-5,4^\circ \text{C}$).

Tabela 4.1. Valores da condutividade térmica de batata reportados na literatura

k, W(m °C) ⁻¹	Região	T _{eq} , °C	U _o , b.u.	Referência
0,50 ± 0,04	resfriamento	-29	0,7372	LeBlanc et al. (1990a)
1,00 ± 0,12	pós-congelamento	-29	0,7372	LeBlanc et al. (1990a)
1,39 ^a	congelamento	–	0,8000	Marin et al. (1985)
1,25 ^b	congelamento	–	0,7372	Marin et al. (1985)
0,438	resfriamento	–	0,8500	Listov & Kalugina citados por Mohsenin (1980)
0,479	–	2,2	–	Dickerson & Read, citados por Ashrae (1993)
0,454	resfriamento	5	–	Ansari & Afaq (1986)
0,47 ± 0,05	–	35,0	0,6 – 0,7	López-Ramos et al. (1993)
0,552	–	40 – 50	0,749	Buhri & Singh (1993)

U_o – teor de umidade; ^a valor experimental; ^b valor estimado; T_{eq} – temperatura do fluido refrigerante

Verifica-se, claramente, o deslocamento da frente de congelamento ao longo de todo processo avançando da superfície para o centro do material, particularmente, iniciando em $x=R_1$, $y=R_2$ e $z=R_3$, onde ocorrem os maiores gradientes de temperatura. Pode-se acompanhar tal comportamento, observando, para o tempo de 313 segundos, as Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, que representam a distribuição de temperatura no centro, num plano intermediário e para o plano da superfície do material, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com os dados experimentais determinados por LeBlanc et al. (1990a).

A mudança de fase água-gelo tem a vantagem de fixar a estrutura do tecido celular e separar a fração de água na fronteira dos cristais de gelo de tal maneira que ambos não estão disponíveis como solventes ou componentes reativos. Desta forma, a difusão de outros solutos no tecido celular é muito lenta, fato que, aliado à redução de temperatura, ajuda na conservação das propriedades organolépticas do material congelado. Contudo, o tamanho e a localização dos cristais de gelo podem danificar as membranas celulares e romper a estrutura física do material. Nesta situação, a diminuição do tempo do período de mudança de fase contribui na obtenção de um produto final de melhor qualidade (Delgado & Sun, 2001).

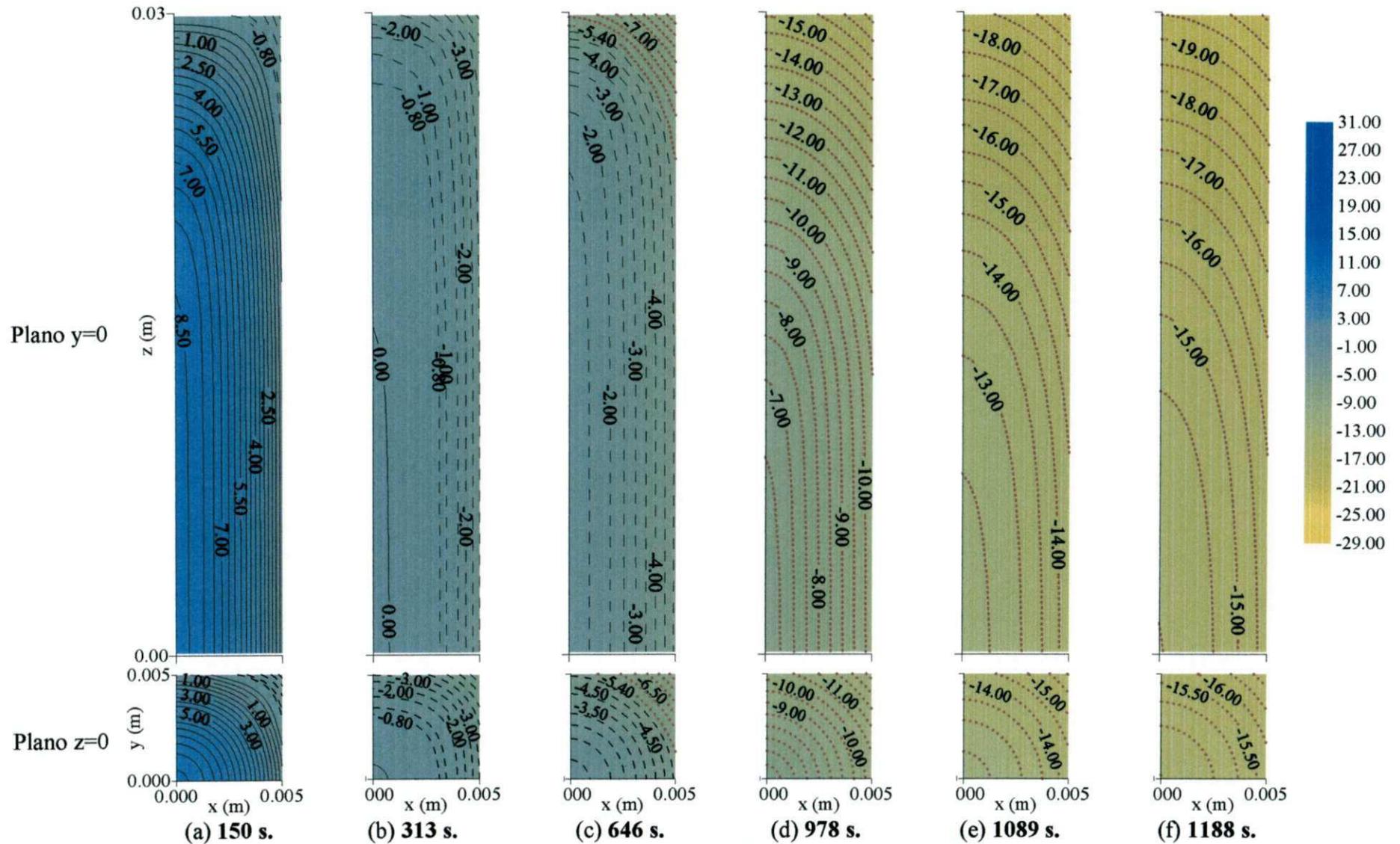


Figura 4.2. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 150 s; (b) 313 s; (c) 646 s; (d) 978 s; (e) 1089 s; e (f) 1188 s. $U_o=73,72\%$ b.u. (dimensões $10 \times 10 \times 60 \text{mm}$)

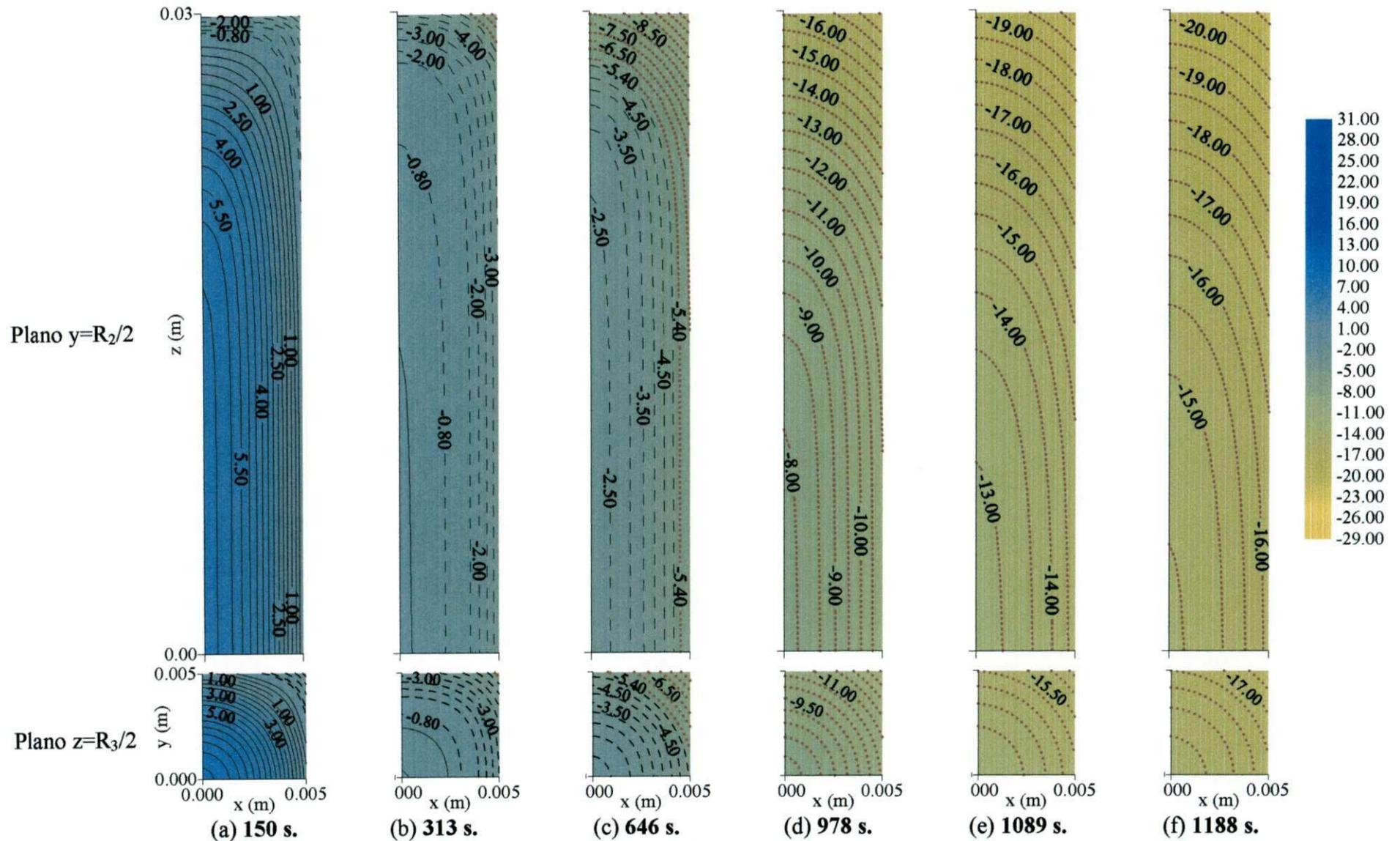


Figura 4.3. Distribuição de temperatura nos planos $y=R_2/2=0,0025\text{m}$ e $z=R_3/2=0,015\text{m}$, nos tempos (a) 150 s; (b) 313 s; (c) 646 s; (d) 978 s; (e) 1089 s; e (f) 1188 s. $U_0=73,72\%$ b.u. (dimensões $10\times 10\times 60\text{mm}$)

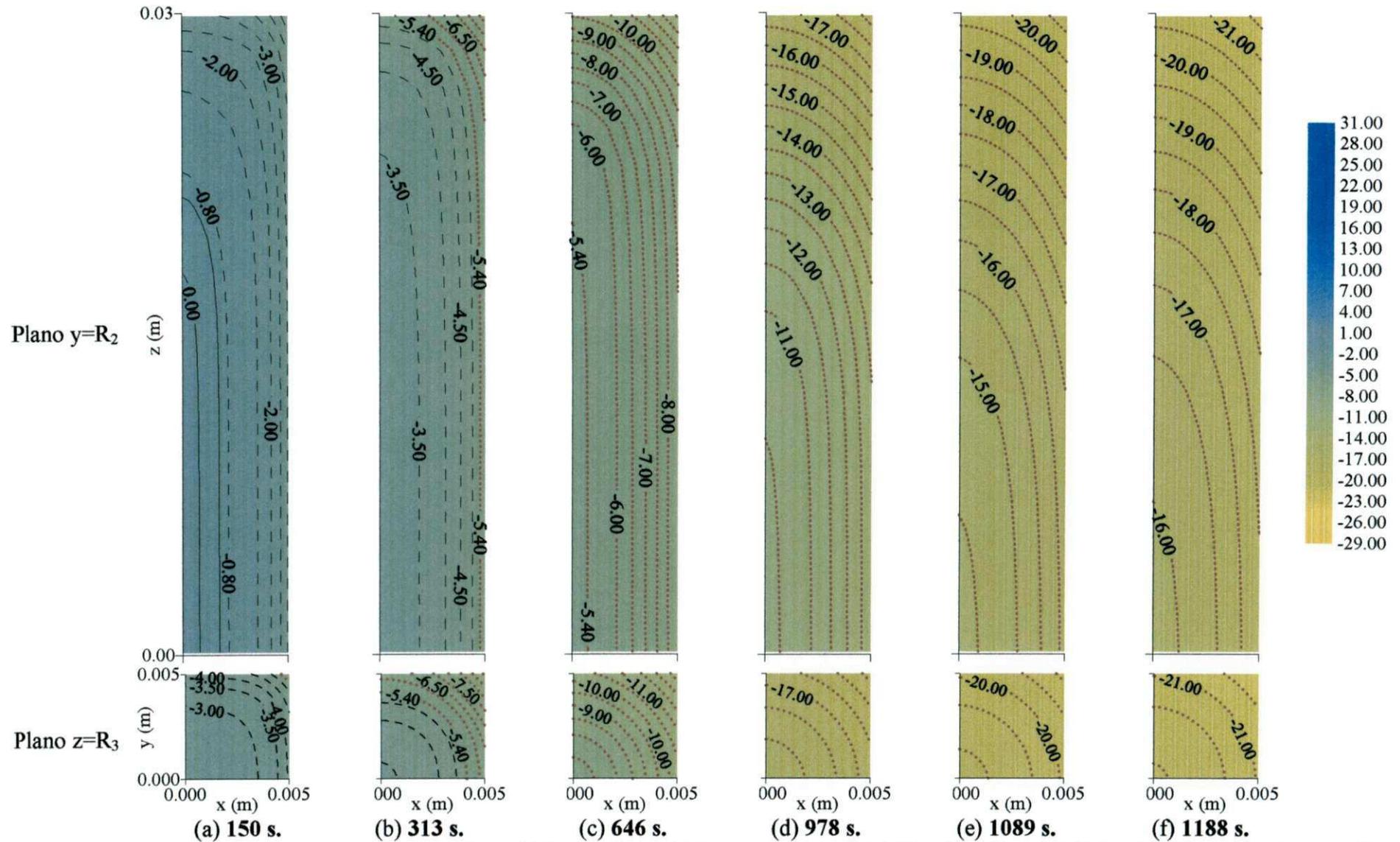


Figura 4.4. Distribuição de temperatura nos planos $y=R_2=0,005\text{m}$ e $z=R_3=0,030\text{m}$, nos tempos (a) 150 s; (b) 313 s; (c) 646 s; (d) 978 s; (e) 1089 s; e (f) 1188 s. $U_0=73,72\%$ b.u. (dimensões $10\times 10\times 60\text{mm}$)

Pode-se dizer, então, que a qualidade do produto congelado é fortemente dependente da taxa de congelamento a que o mesmo está submetido durante o processo. Congelamento lento produz cristais de gelo em áreas extracelulares apenas, enquanto que o congelamento rápido produz pequenos cristais de gelo uniformemente distribuídos sobre todo tecido celular. Desde que exista um gradiente de temperatura no material, os cristais formados nas proximidades da superfície são menores, aumentando em direção ao centro do sólido.

Vale ressaltar que a cristalização do gelo, ocorrendo a uma mesma temperatura, é diferente de um tecido para outro, isto ocorre, principalmente, devido a diferença de mobilidade da água no interior dos diversos tecidos.

Do exposto, pode-se afirmar que a modelagem numérica aqui apresentada é de grande utilidade na identificação e localização da frente de congelamento no interior da fatia de batata pré-processada durante o processo de resfriamento e congelamento. A modelagem também pode ser útil para estimar a condutividade e difusividade térmica de qualquer material, sem restrições à natureza, estrutura, teor de umidade ou outras características.

4.2 Simulação de congelamento

Com a modelagem numérica validada fisicamente, apresenta-se a seguir, um estudo sobre o efeito do teor de umidade inicial e dimensões de fatias de batatas pré-processadas, sobre a sua cinética de resfriamento e congelamento. Estes resultados podem ser de grande utilidade para indústria de processamento deste produto, pois por meio deles, torna-se possível planejar, bem como otimizar o processamento.

4.2.1 Influência das dimensões do produto

Na Figura 4.5, apresenta-se a influência das dimensões da batata palito pré-processada na sua cinética de resfriamento e congelamento, bem como a taxa de transferência de calor ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$) para as três fases do processo. Como discutido na seção anterior, por meio do comportamento da taxa de congelamento, foram determinados os tempos de início e fim do processo de mudança de fase para cada dimensão do produto. Este procedimento foi utilizado, experimentalmente por Rahman et al. (2002).

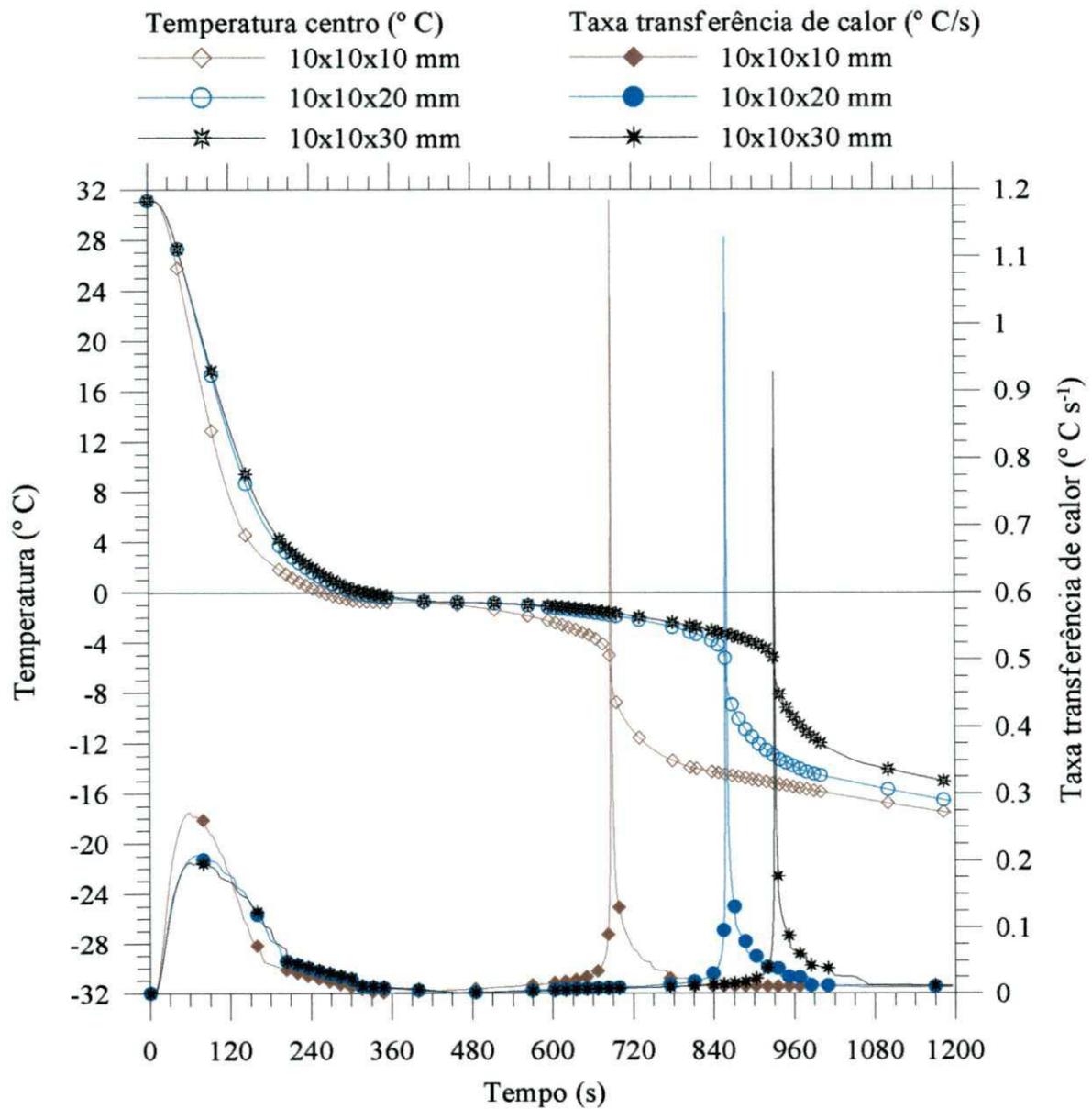


Figura 4.5. Influência das dimensões da batata pré-processada em sua cinética de resfriamento e congelamento ($U_o=0,7372$ b.u.)

Na Tabela 4.2, encontram-se os tempos de processo para as três dimensões simuladas, bem como a relação (área)/(volume) para cada uma delas. Da análise da Figura 4.5, em conjunto com a Tabela 4.2, é possível afirmar que, quanto menores são as dimensões do produto, menor é o tempo total de processo, ou seja, o produto congela mais rapidamente. Isto pode ser explicado fisicamente pela relação (área)/(volume) para cada dimensão característica. Quanto maior é esta relação, mais rápido ocorre o congelamento, pois a área superficial do produto em relação ao seu volume é superior.

Tabela 4.2. Tempos de processo para várias dimensões característicos da batata

Tamanho característico (mm ³)	Início congelamento, t_L (segundos)	Fim congelamento, t_S (segundos)	Processo de mudança de fase (segundos)	Relação (área)/(volume) (m ² m ⁻³)
10x10x10	300,0	688,0	388,0	0,60
10x10x20	313,0	859,0	546,0	0,50
10x10x30	313,0	931,0	618,0	0,47
10x10x60	313,0	979,0	666,0	0,43

Nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8, encontram-se os perfis de temperatura, para dois planos localizados no centro do material (plano $y=0$ e plano $z=0$). Os perfis são apresentados para seis tempos de processo, incluindo o tempo inicial e final de mudança de fase (congelamento), para cada dimensão característica.

Analisando as Figuras 4.6c, 4.7c e 4.8c, observa-se a presença de duas regiões distintas no interior do material em estudo, ou seja, a região de transição onde coexistem água e gelo (temperaturas de $-0,8$ a $-5,4^\circ$ C, isolinhas tracejadas), e também a região do material onde a solidificação já ocorreu por completo (temperaturas inferiores a $-5,4^\circ$ C, isolinhas pontilhadas). Portanto, por meio do modelamento matemático ora apresentado neste trabalho, é possível determinar com precisão, em termos de transferência de calor, os tempos de início e fim de do processo de mudança de fase, bem como acompanhar a frente de solidificação, para várias dimensões do produto, independente de sua natureza. Montague et al. (2003) destacam a importância da capacidade de adequação da unidade de processamento para atender as necessidades de seus clientes.

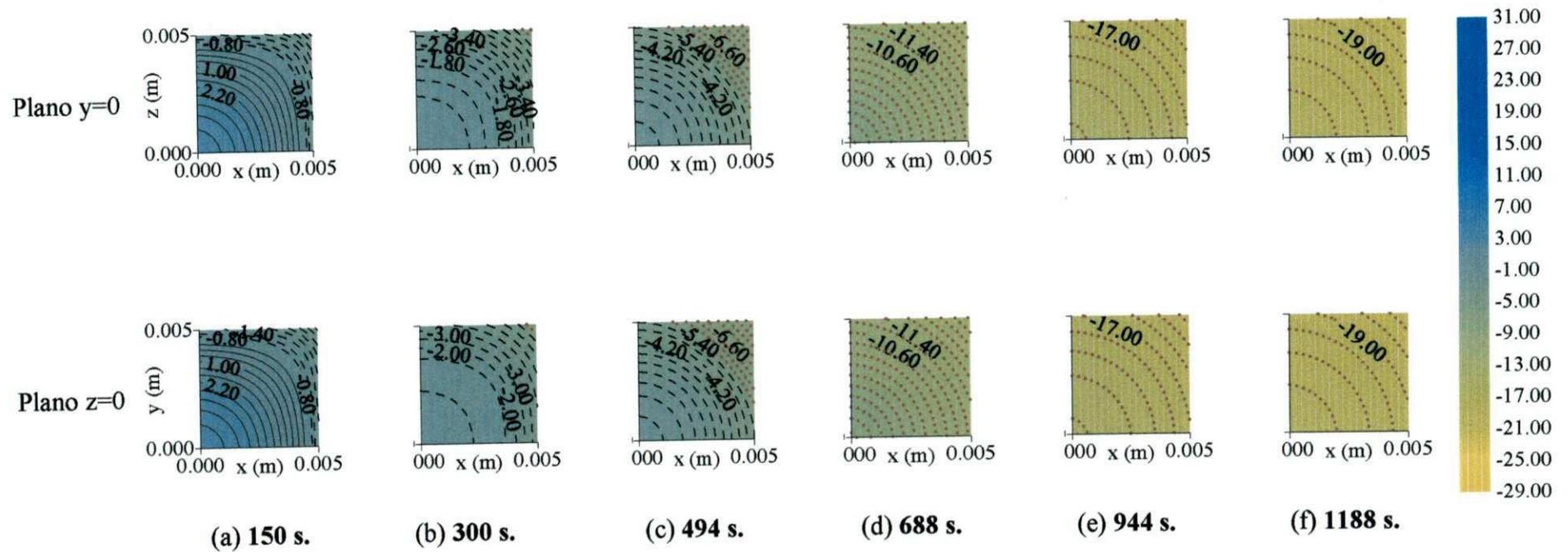


Figura 4.6. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 150 s; (b) 300 s; (c) 494 s; (d) 688 s; (e) 944 s; e (f) 1188 s. $U_o=73,72\%$ b.u. (dimensões 10x10x10mm)

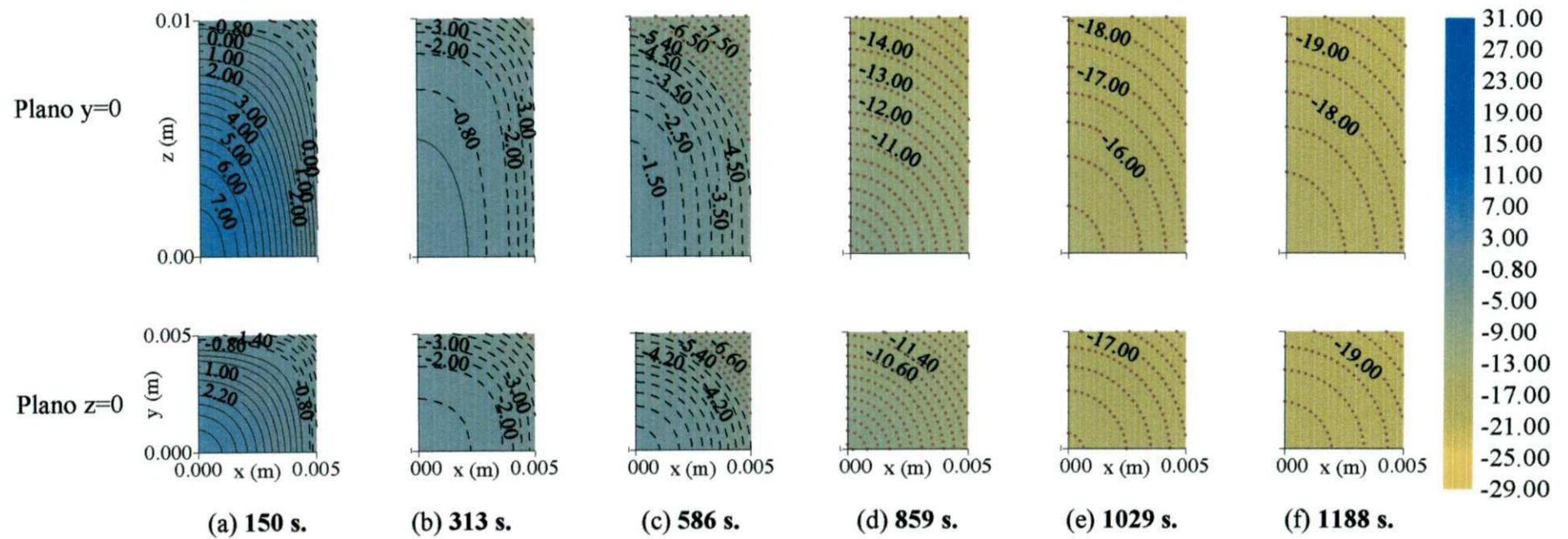


Figura 4.7. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 150 s; (b) 313 s; (c) 586 s; (d) 859 s; (e) 1029 s; e (f) 1188 s. $U_o=73,72\%$ b.u. (dimensões $10 \times 10 \times 20 \text{ mm}$)

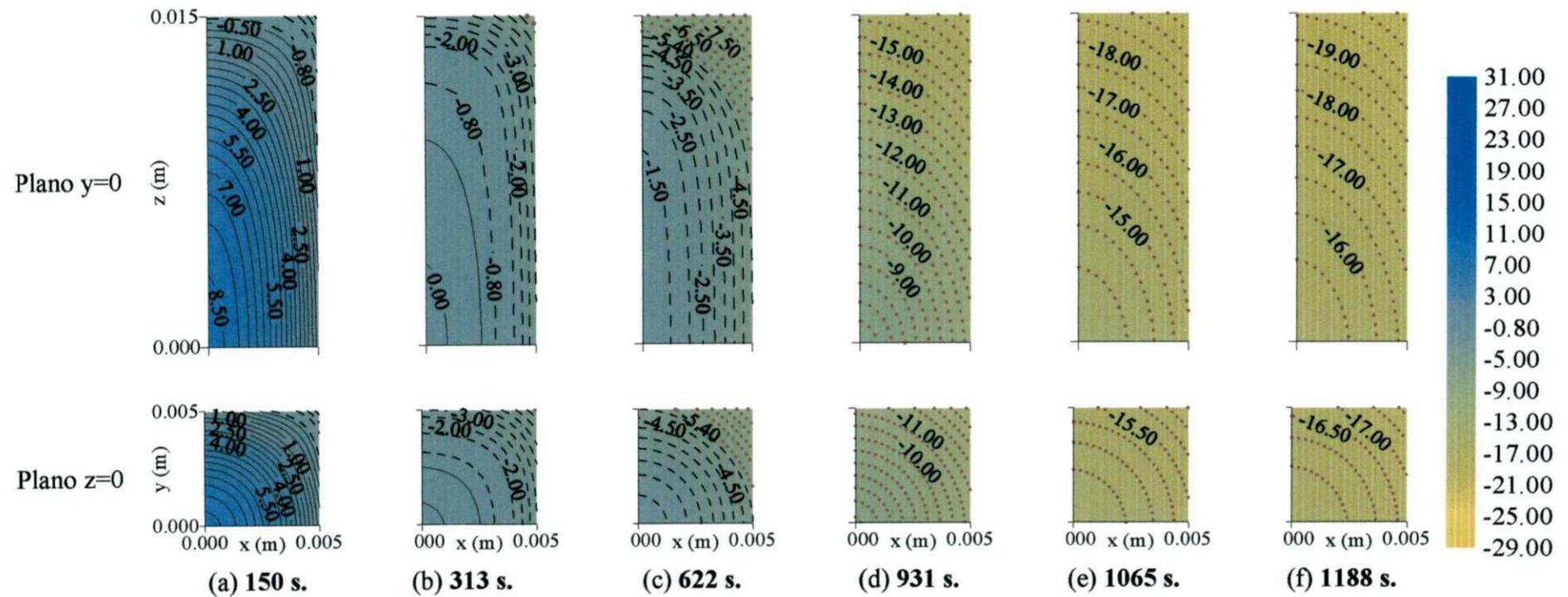


Figura 4.8. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 150 s; (b) 313 s; (c) 622 s; (d) 931 s; (e) 1065 s; e (f) 1188 s. $U_o=73,72\%$ b.u. (dimensões 10x10x30mm)

4.2.2 Influência do teor de umidade inicial do produto

No caso específico da batata palito pré-processada a qualidade, particularmente em relação à textura do produto depois de congelado, está fortemente ligada ao seu teor de umidade no início do processo (Montague et al., 2003). Na Figura 4.9 têm-se os resultados numéricos de cinética de resfriamento e congelamento, bem como, taxa de transferência de calor ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$), calculadas, respectivamente para os conteúdos de umidade inicial de 20, 30, 40 e 50% b.u. (base úmida).

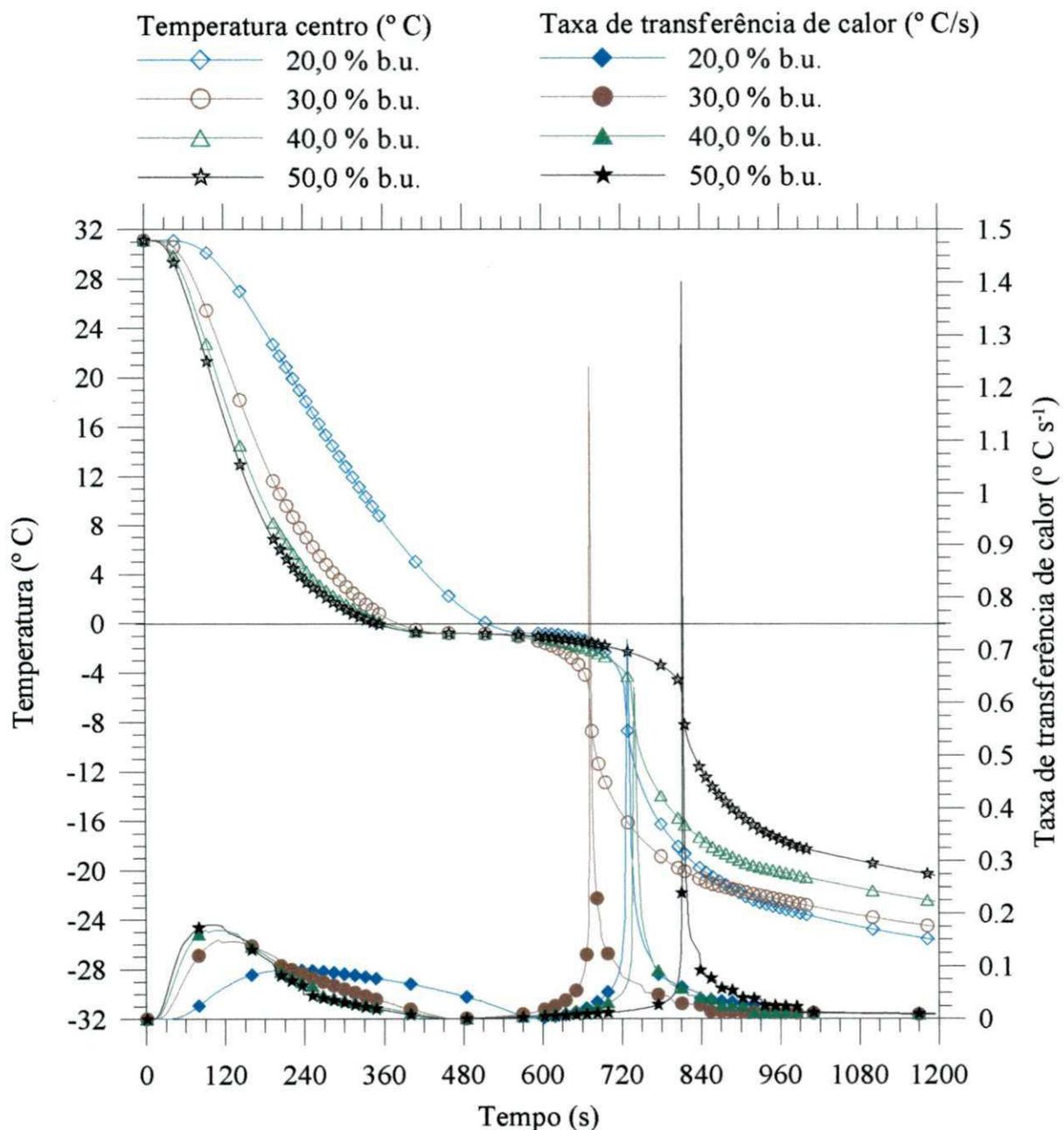


Figura 4.9. Influência do teor de umidade inicial da batata pré-processada em sua cinética de resfriamento e congelamento (Dimensões: 10x10x60 mm)

Os tempos de início e fim de congelamento (mudança de fase) foram determinados, como discutido nas seções anteriores, por meio do comportamento característico da taxa de congelamento durante o processo. Na Tabela 4.3 apresentam-se os parâmetros de processo para cada teor de umidade inicial do material.

Tabela 4.3. Parâmetros de processo para vários teores de umidade da batata

U_0 (% b.u.)	Calor latente de solidificação, L_S ($J\ kg^{-1}$)	Início congelamento, t_L (segundos)	Fim congelamento, t_S (segundos)	Processo de mudança de fase (segundos)
20,0	66.980,0	564,0	724,0	160,0
30,0	100.470,0	444,0	664,0	220,0
40,0	133.960,0	432,0	736,0	304,0
50,0	167.450,0	432,0	809,0	377,0

$L_S=L_0U_0$, onde $L_0=334900,0\ J/kg$ é o calor latente de solidificação da água pura

Analisando os dados da Tabela 4.3 juntamente com a Figura 4.9, verifica-se, como era esperado, que quanto menor o teor de umidade inicial do produto, menor é o tempo de solidificação da água no interior do mesmo. Observa-se, também, que para o menor teor de umidade (20%), foi maior o tempo de início de congelamento, tal comportamento está ligado ao valor das propriedades termofísicas para este teor de umidade, particularmente sua condutividade térmica, que diminui. Neste contexto, é importante notar o efeito da difusividade térmica em cada uma das fases da cinética de congelamento. Para todos os teores de umidade, a difusividade do material congelado é superior à do produto descongelado (ver Tabela 3.2), o que explica o rápido decaimento de temperatura, logo após a solidificação da água em todos os casos estudados.

Nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13, encontram-se os perfis bidimensionais de temperatura no interior do material, para os teores de umidade inicial de 20, 30, 40 e 50% b.u., respectivamente. Os perfis são referentes aos planos $x=0$ e $y=0$, em seis diferentes tempos de processo.

Nesta seção (como explicado nas seções anteriores) a região onde existem simultaneamente água e gelo é representada pelas linhas isotérmicas tracejadas (temperatura de $-0,8$ a $-5,4^\circ\ C$) enquanto que, a região do material onde a água livre encontra-se totalmente

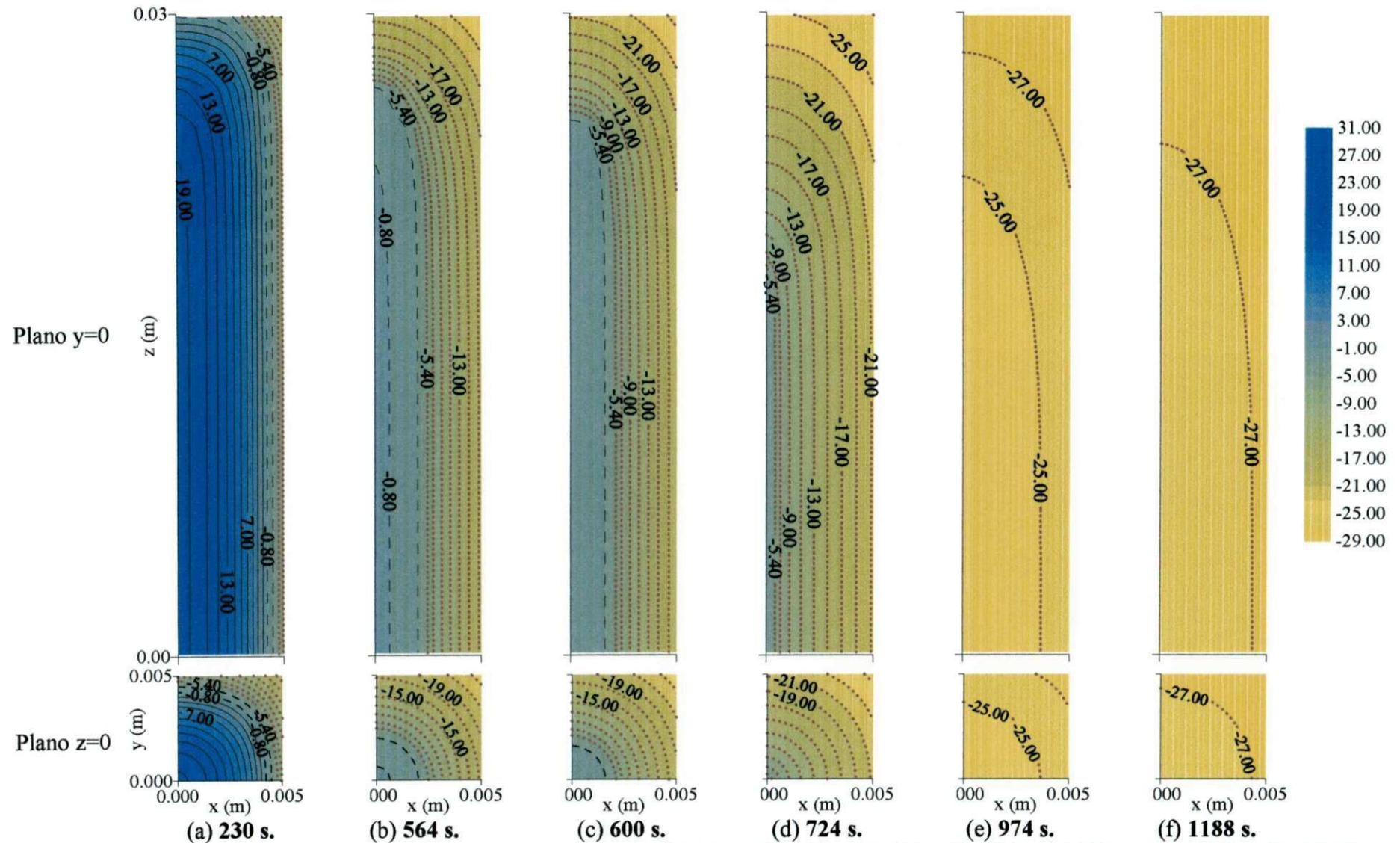


Figura 4.10. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 230 s; (b) 564 s; (c) 600 s; (d) 724 s; (e) 974 s; e (f) 1188 s. $U_o=20,0\%$ b.u. (dimensões $10 \times 10 \times 60$ mm)

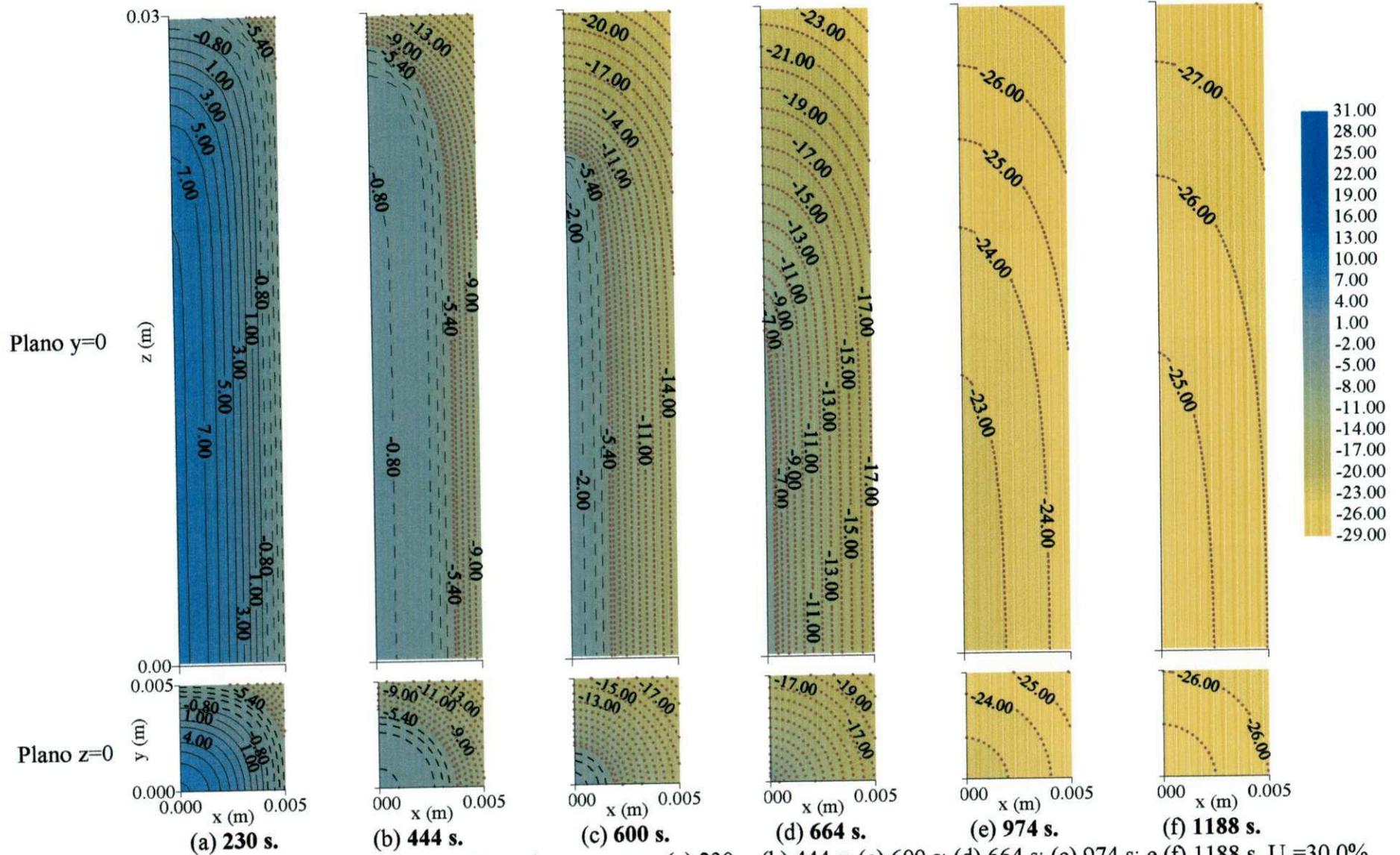


Figura 4.11. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 230 s; (b) 444 s; (c) 600 s; (d) 664 s; (e) 974 s; e (f) 1188 s. $U_0=30,0\%$ b.u. (dimensões 10x10x60mm)

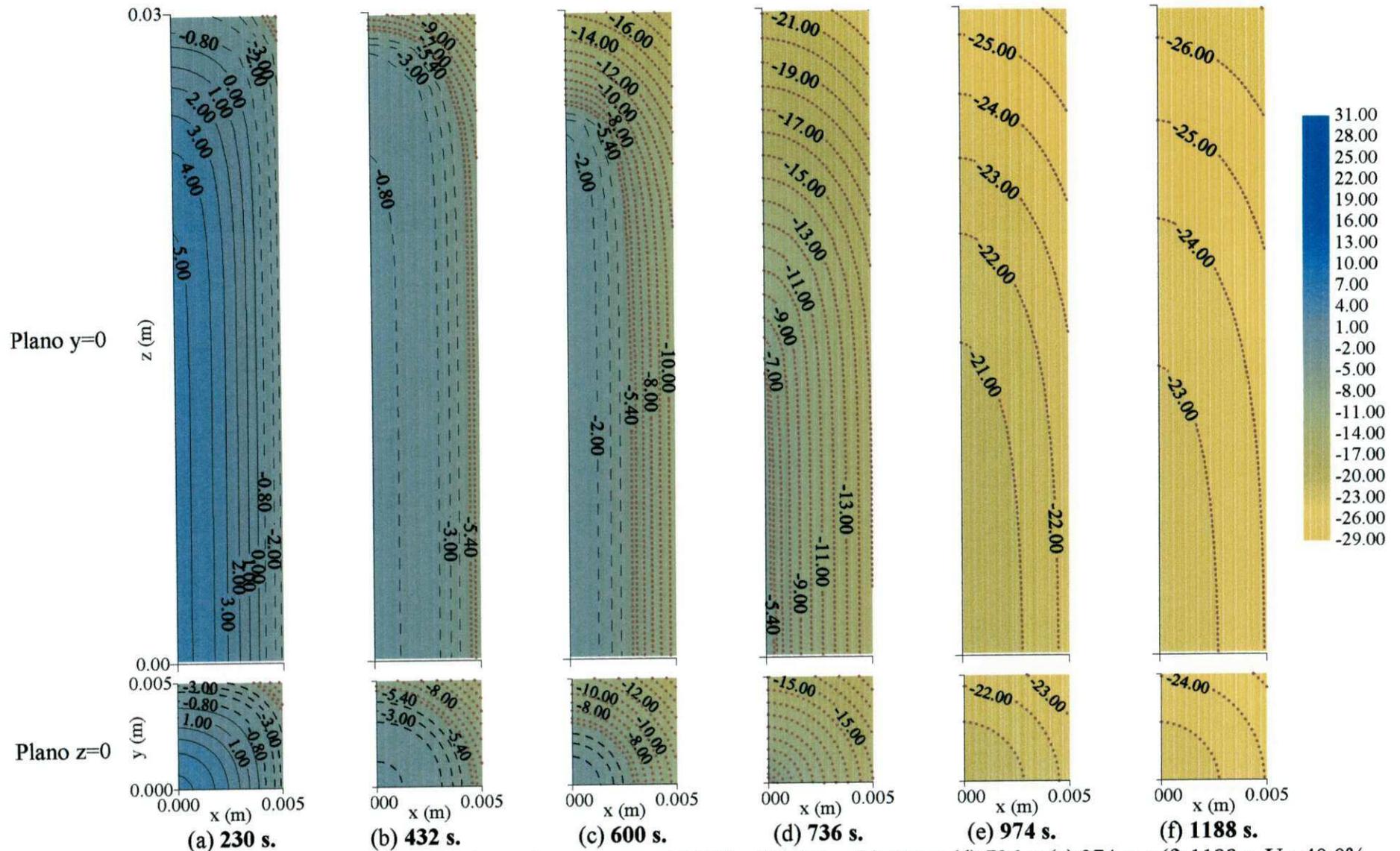


Figura 4.12. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 230 s; (b) 432 s; (c) 600 s; (d) 736 s; (e) 974 s; e (f) 1188 s. $U_o=40,0\%$ b.u. (dimensões $10 \times 10 \times 60$ mm)

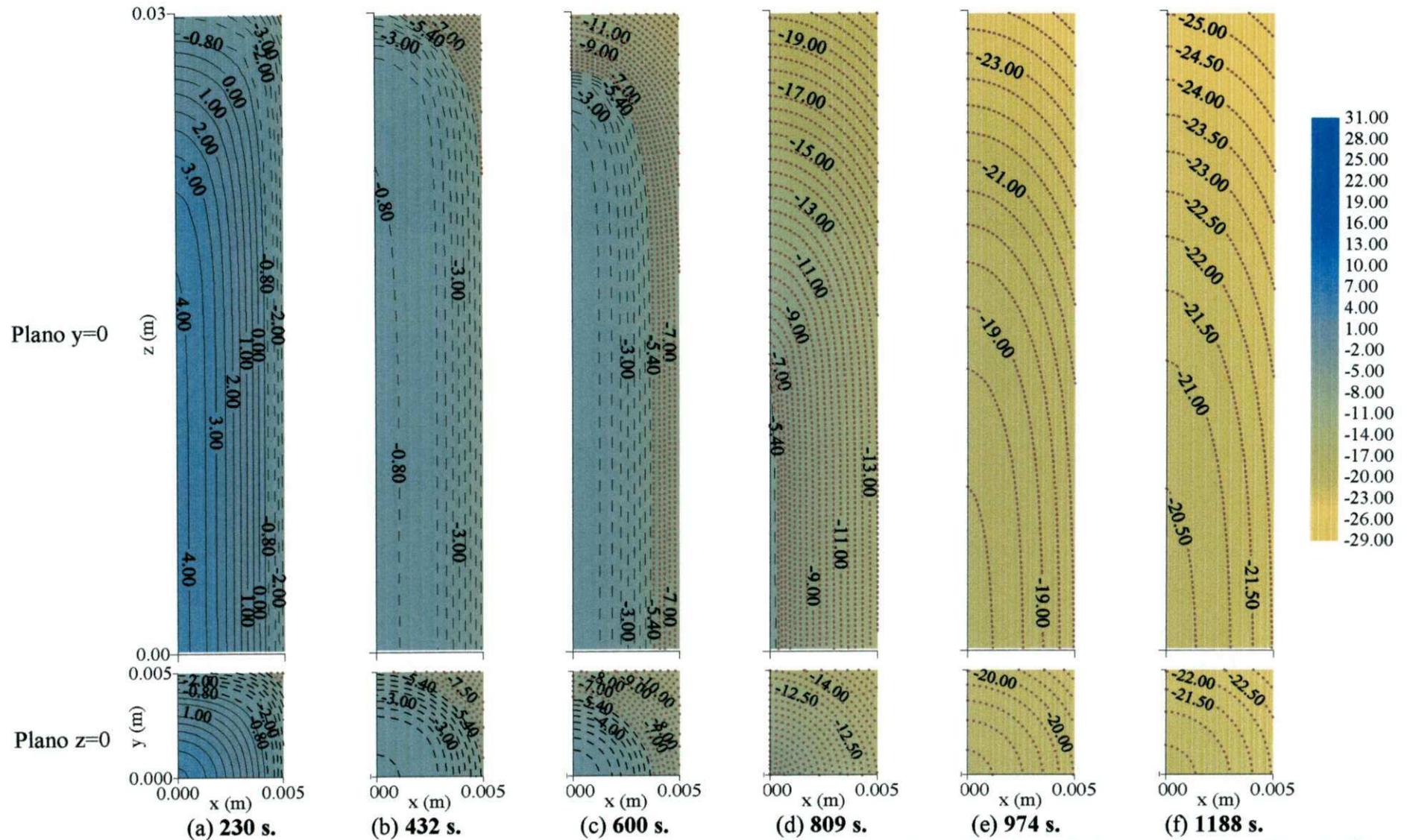


Figura 4.13. Distribuição de temperatura nos planos $y=0$ e $z=0$, nos tempos (a) 230 s; (b) 432 s; (c) 600 s; (d) 809 s; (e) 974 s; e (f) 1188 s. $U_o=50,0\%$ b.u. (dimensões $10 \times 10 \times 60$ mm)

congelada é representada pelas linhas isotérmicas pontilhadas (temperaturas inferiores a $-5,4^{\circ}\text{C}$). Observando atentamente os perfis de temperatura para os teores de umidade de 20, 30 e 40% b.u. no tempo de 230 s (Figuras 4.10a, 4.11a e 4.12a), verifica-se a existência de três regiões distintas, ou seja, tem-se uma região onde o produto está completamente descongelado (linhas isotérmicas contínuas, temperaturas superiores a $-0,8^{\circ}\text{C}$). Outra região onde coexistem gelo e água (linhas isotérmicas tracejadas, temperaturas de $-0,8^{\circ}\text{C}$ a $-5,4^{\circ}\text{C}$) e ainda uma considerável região de água congelada (linhas isotérmicas pontilhadas, temperaturas inferiores a $-5,4^{\circ}\text{C}$). Este comportamento da água no interior da batata não é desejável, pois a mesma ficará submetida a tensões mecânicas devido a grande diferença de temperatura das fases da água no interior do produto. Conseqüentemente, acarretando perda na qualidade do produto.

Como se pode observar na Figuras 4.10a, 4.11a, 4.12a e 4.13a, a condição mais crítica deste comportamento ocorre quando o teor de umidade inicial é de 20% b.u., diminuindo seu efeito à medida que o teor de umidade aumenta.

Do exposto, o principal objetivo desta seção, não é adentrar e discutir em profundidade os aspectos quantitativos e/ou qualitativos da batata quando congelada em diferentes teores de umidade diferentes. O que se quer mostrar aqui, na verdade, é a versatilidade e a aplicabilidade que possui a modelagem matemática ora apresentada. É fato que para validar estes resultados, estudos experimentais devem ser conduzidos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- ✓ A modelagem matemática e a técnica utilizada na resolução da equação governante foram adequadas e têm grande potencial, verificado pela comparação entre as temperaturas calculadas numericamente com aquelas medidas experimentalmente. Ela é útil para estimar a condutividade e a difusividade térmica de qualquer material, sem restrições à natureza, estrutura, conteúdo de umidade ou outras características;
- ✓ Os coeficientes de transporte obtidos para batata pré-processada foram: $k=0,47 \text{ W (m}^\circ \text{ C)}^{-1}$ no período de pré-congelamento e de $0,98 \text{ W (m}^\circ \text{ C)}^{-1}$ no período de pós-congelamento, e $h=52,0 \text{ W (m}^2 \text{ }^\circ \text{ C)}^{-1}$ para uma temperatura e velocidade do ar refrigerante de $-29,0^\circ \text{ C}$ e $0,5 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente;

- ✓ Os maiores gradientes de temperatura foram encontrados próximo à superfície do material em torno de seu vértice, região esta onde inicia o congelamento da água no sólido avançando para o centro do mesmo;
- ✓ As dimensões do corpo interfere na cinética de congelamento, ou seja, quanto maior a relação (área)/(volume) mais rápida ocorrerá a transformação da água em gelo, para as mesmas condições termodinâmicas do processo;
- ✓ O teor de umidade inicial do material influencia fortemente na cinética de congelamento de batata palito pré-processada, uma vez que, quanto menor for o valor desta variável, menor será o tempo de congelamento (mudança de fase) do material, para as mesmas condições de processo.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- ✓ Aplicar o modelamento matemático apresentado neste estudo a outros produtos com forma de paralelepípedo, independente da sua natureza (frutas *in natura*, vegetais minimamente processados, dentre outros);
- ✓ Abordar o problema com propriedades variáveis nas três fases da cinética de congelamento e não somente na região de solidificação;
- ✓ Incorporar ao modelo a análise de transferência de massa (umidade) como forma de prever a perda de umidade que ocorre durante o processo;
- ✓ Acrescentar na modelagem matemática, a variação volumétrica do material quando da mudança de fase da água contida no mesmo e, verificar seu efeito sobre as fases do processo de resfriamento e congelamento;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agnelli, M.E.; Mascheroni, R.H. Cryomechanical freezing. A model for the heat transfer process. *Journal of Food Engineering*, v.47, n.4, p.263-270, 2001.

Alhama, F.; Fernández, C.F.G. Transient thermal behavior of phase-change process in solid foods with variable thermal properties. *Journal of Food Engineering*, v.54, n.4, p.331-336, 2002.

Ansari, F.A.; Afaq, A. New method to measuring thermal diffusivity of spherical produce. *International Journal of Refrigeration*, n.9, v.3, p.158-160, 1986.

Ashrae Handbook. Thermal properties of foods. American Society of Heating, Refrigeration and air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 1993.

Becker, B.R.; Fricke, B.A. Heat transfer coefficients for forced-air cooling and freezing of selected foods. *International Journal of Refrigeration*, v.27, n.5, p.540-551, 2004.

Briley, P.E.G.C. Moisture loss during freezing. *ASHRAE Journal*, v.44, n.11, p.68, 2002.

Buhri, A.B.; Sigh, R.P. Measurement of food thermal conductivity using differential scanning calorimetry. *Journal of Food Science*, v.58, n.5, p.1145-1147, 1993.

Chevalier, D.; Le Bail, A.; Ghoul, M. Freezing and ice crystals formed in a cylindrical food model: part I. Freezing at atmospheric pressure. *Journal of Food Engineering*, v.46, n.4, p.277-285, 2000a.

Chevalier, D.; Le Bail, A.; Ghoul, M. Freezing and ice crystals formed in a cylindrical food model: part II. Comparison between freezing at atmospheric pressure and pressure-shift freezing. *Journal of Food Engineering*, v.46, n.4, p.287-293, 2000b.

Chuntranuluck, S.; Wells, C.M.; Cleland, A.C. Prediction of chilling times of foods in situations where evaporative cooling is significant – part 1. Method development. *Journal of Food Engineering*, v.37, n.2, p.111-125, 1998a.

Chuntranuluck, S.; Wells, C.M.; Cleland, A.C. Prediction of chilling times of foods in situations where evaporative cooling is significant – part 2. Experimental testing. *Journal of Food Engineering*, v.37, n.2, p.127-141, 1998b.

Chuntranuluck, S.; Wells, C.M.; Cleland, A.C. Prediction of chilling times of foods in situations where evaporative cooling is significant – part 3. Applications. *Journal of Food Engineering*, v.37, n.2, p.143-157, 1998c.

Cleland, A.C.; Earle, R.L. A simple method for predicting heating and cooling rates in solids of various shapes. *International Journal of Refrigeration*, v.5, n.2, p.98-106, 1982.

Coelho, A.H.R.; Vilela, E.R.; Rezende Chagas, S.J de. Qualidade de batata (*Solanum tuberosum* L.) para fritura, em função dos níveis de açúcares redutores e amido, durante o armazenamento refrigerado e à temperatura ambiente com atmosfera modificada. *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*, v.23, n.4, p.899-910, 1999.

Crespo, R.S. Solução numérica do problema de mudança de fase usando formulação em um domínio com acompanhamento da frente. Florianópolis: UFSC, 1996, 173p. Tese Doutorado

Delgado, A.E.; Sun, D.W. Heat and mass transfer models for predicting freezing process – a review. *Journal of Food Engineering*, v.47, n.3, p.157-174, 2001.

FAOSTAT Agriculture data, 2002. Disponível em: <http://faostat.fao.org/faostat>. Acesso em 05 de outubro de 2004.

Ferreira, J.C. Efeito do congelamento ultra-rápido sobre as características físico-químicas e sensoriais de polpa de umbu (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara) durante a armazenagem frigorificada. Campina Grande: UFCG, 2000. 112p. Dissertação Mestrado

Fikiin, K.A.; Fikiin, A.G. Predictive equations for thermophysical properties and enthalpy during cooling and freezing of food materials. *Journal of Food Engineering*, v.40, n.1, p.1-6, 1999.

Fortuna, A.de O. Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos – conceitos básicos e aplicações. Edusp, São Paulo, 2000.

Fricke, B.A.; Becker, B.R. Calculation of heat transfer coefficients for foods. *International Communications Heat Mass Transfer*, v.29, n.6, p.731-740, 2002.

Gigiél, A.J.; Collet, P. Energy consumption, rate of cooling and weight loss in beef chilling in UK slaughter houses. *Journal of Food Engineering*, v.10, n.4, p.255-273, 1989.

Haase, N.U.; Weber, L. Ascorbic acid losses during processing of french fries and potato chips. *Journal of Food Engineering*, v.56, n.2-3, p.207-209, 2003.

Hossain, Md.M; Cleland, D.J.; Cleland, A.C. Prediction of freezing and thawing times for foods of three-dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. *International Journal of Refrigeration*, v.15, n.4, p.241-246, 1992.

IBGE, 2003. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 05 de outubro de 2004.

Incropera, F.P.; DeWitt, D.P. Fundamentals of heat and mass transfer. New York: John Wiley & Sons, 2002. 979p.

Kuitche, A.; Daudin, J.D.; Letang, G. Modeling of temperature and weight loss kinetics during meat chilling for time-variable conditions using an analytical-based method - I. The

model and its sensitivity to certain parameters. *Journal of Food Engineering*, v.28, n.1, p.55-84, 1996.

Lan, S.H.; Farid, M.M. Experimental analysis of cryogenic freezing of food. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v.37, n.2, p.304-309, 2004.

LeBlanc, D.I.; Kok, R.; Timbers, G.E. Freezing of a parallelepiped food product. Part 1. Experimental determination. *International Journal of Refrigeration*, v.13, n.6, p.371-378, 1990a.

LeBlanc, D.I.; Kok, R.; Timbers, G.E. Freezing of a parallelepiped food product. Part 2. Comparison of experimental and calculated results. *International Journal of Refrigeration*, v.13, n.6, p.379-392, 1990b.

Lima, A.G.B. Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: Secagem de banana. Campinas: UNICAMP, 1999. 239p. Tese Doutorado.

Limeira, R. da R. Solidificação de ligas metálicas via método dos volumes finitos. Campina Grande: UFCG, 2003. 51p. Trabalho Conclusão de Curso

Lind, I. The measurement and prediction of thermal properties of food during freezing and thawing – a review with particular reference to meat and dough. *Journal of Food Engineering*, v.13, n.4, p.285-319, 1991.

López-Leiva, M.; Hallstron, B. The original Planck equation and its use in the development of food freezing rate predictions. *Journal of Food Engineering*, v.58, n.x, p.267-275, 2003.

López-Ramos, A.; Palmisano, E.; Dombey, A. Pimentel, J.A.; Fayés, D.; González-Mendizável, D. Propriedades térmicas de frutas y hortalizas tropicales. *Revista Especializada em Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.33, n.3, p.271-283, 1993.

Maliska, C.R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: Fundamentos e coordenadas generalizadas. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 1995. 424 p.

Mallikarjunan, P.; Mittal, G.S. Heat and mass transfer during beef carcass chilling - modeling and simulation. *Journal of Food Engineering*, v.23, n.3, p.277-292, 1994.

Mannapperuma, J.D.; Singh, R.P. A computer-aided method for the prediction of properties and freezing/thawing times of foods. *Journal of Food Engineering*, v.9, n.4, p.275-304, 1989.

Marin, M., Rios, G.M.; Gilbert, H. Use of time-temperature data during fluidized bed freezing to determine frozen food properties. *Journal of Food Process Engineering*, v.7, n.4, p.253-264, 1985.

Mohsenin, N.N. *Thermal properties of foods and agricultural materials*. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1980, 407p.

Montague, G.A.; Glassey, J.; Willis, M.J. French fry quality improvement using advanced control techniques. *Journal of Food Engineering*, v.57, n.4, p.357-365, 2003.

Moraga, N.O.; Barraza, H.G. Predicting heat conduction during solidification of a food inside a freezer due to natural convection. *Journal of Food Engineering*, v.56, n.1, p.17-26, 2002.

Moraga, N.O.; Medina, E.E. Conjugate forced convection and heat conduction with freezing of water content in a plate shaped food. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.43, n.1, p.57-67, 2000.

Moureh, J.; Derens, E. Numerical modeling of the temperature increase in frozen food packaged in pallets in the distribution chain. *International Journal of Refrigeration*, v.23, n.7, p.540-552, 2000.

Nascimento, J.J.S. Fenômeno de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos. João Pessoa: UFPB, 2002. 181p. Tese Doutorado

Patankar, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York: Ed. Hemisphere Publishing Corporation, 1980, 80p.

- Pham, Q.T. Analytical method for predicting freezing times of rectangular blocks of foodstuffs. *International Journal of Refrigeration*, v.8, n.1, p.43-47, 1985.
- Rahman, M. S. Thermal conductivity of four food materials as a single function of porosity and water content. *Journal of Food Engineering*, v.15, n.4, p.261-268, 1992.
- Rahman, M.S.; Guizani, N.; Al-Khaseibi, M.; Al-Hinai, S.A.; Al-Maskri, S.S.; Al-Hamhami, K. Analysis of cooling curve to determine the end point freezing. *Food Hydrocolloids*, v.16, n.6, p.653-659, 2002.
- Ramaswamy, H.S.; Tung, M.A. Review on predicting freezing times of foods. *Journal of Food Process Engineering*, v.7, n.3, p.169-203, 1984.
- Ross, Y.H. Thermal analysis, state transitions and food quality. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v.71, n.1, p.197-203, 2003.
- Salvadori, V.O.; Reynoso, R.O.; De Michelis, A.; Mascheroni, R.H. Freezing time predictions for regular shaped foods: a simplified graphical method. *International Journal of Refrigeration*, v.10, n.6, p.357-361, 1987.
- Sanz, P.D.; Elvira, C. De; Martino, M.; Zaritzky, N.; Otero, L.; Carrasco, J.A. Freezing rate simulation as an aid to reducing crystallization damage in foods. *Meat Science*, v.52, n.3, p.275-278, 1999.
- Silva, M. da. Cinética de resfriamento e congelamento dos frutos de cajá (*Spondias lutea*, L.). Campina Grande-PB: UFCG, 2002. 100p. Dissertação Mestrado
- Songming, Z.; Ramaswamy, H.S.; Le Bial, A. Ice-crystal formation in gelatin gel during pressure shift versus conventional freezing. *Journal of Food Engineering*, v.66, n.1, p.69-76, 2005.
- Tocci, A.M.; Mascheroni, R.H. Numerical models for the simulation of the simultaneous heat and mass transfer during food freezing and storage, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v.22, n.2, p.251-260, 1995.

Versteeg, H.K.; Malalasekera, W. An Introduction to computational fluid dynamics – the finite volume method. London: Prentice Hall, 1995, 257p.

Wang, N.; Brennan, J.G. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, v.24, n.1, p.61-76, 1995.

Wang, N.; Brennan, J.G. The Influence of Moisture Content and Temperature on the Specific Heat of Potato Measured by Differential Scanning Calorimetry. *Journal of Food Engineering*, v.19, n.3, p.303-310, 1993.

Wang, N.; Brennan, J.G. Thermal conductivity of potato as a function of moisture content. *Journal of Food Engineering*, v.17, n.2, p.153-160, 1992.

Woinet, B.; Andrieu, J.; Laurent, M.; Min, S.G. Experimental and theoretical study of model food freezing. Part I. Heat transfer modeling. *Journal of Food Engineering*, v.35, n.4, p.381-393, 1998a.

Woinet, B.; Andrieu, J.; Laurent, M.; Min, S.G. Experimental and theoretical study of model food freezing. Part II. Characterization and modeling of the ice crystal size. *Journal of Food Engineering*, v.35, n.4, p.395-407, 1998b.