



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**



**VANDERSON ALVES AGRA BRANDÃO**

**RESFRIAMENTO E CONGELAMENTO DE SÓLIDOS COM FORMA  
COMPLEXA VIA TÉCNICA DA FLUIDODINÂMICA  
COMPUTACIONAL. ESTUDO DE CASO: PEDÚNCULO DO CAJU**

**CAMPINA GRANDE – PB**

Dezembro, 2016

VANDERSON ALVES AGRA BRANDÃO

**RESFRIAMENTO E CONGELAMENTO DE SÓLIDOS COM FORMA  
COMPLEXA VIA TÉCNICA DA FLUIDODINÂMICA  
COMPUTACIONAL. ESTUDO DE CASO: PEDÚNCULO DO CAJU**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

CAMPINA GRANDE – PB

Dezembro, 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B817r Brandão, Vanderson Alves Agra.  
Resfriamento e congelamento de sólidos com forma complexa via técnica da fluidodinâmica computacional. Estudo de caso : pedúnculo do caju / Vanderson Alves Agra Brandão. – Campina Grande, 2017.  
158 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.  
"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".  
Referências.

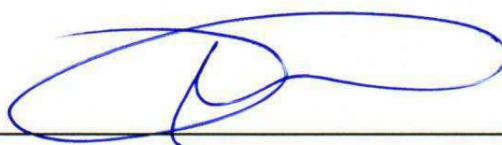
1. Fruta. 2. Conservação. 3. Simulação. 4. CFX. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 634.573:664.853(043)

“RESFRIAMENTO E CONGELAMENTO DE SÓLIDOS COM FORMA COMPLEXA  
VIA TÉCNICA DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL. ESTUDO DE CASO:  
PEDÚNCULO DO CAJÚ”.

**VANDERSON ALVES AGRA BRANDÃO**

Dissertação Aprovada em 22/12/2016 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes  
membros:



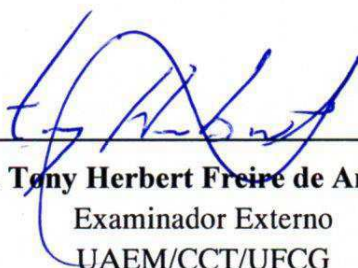
---

**Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**  
Orientador  
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



---

**Dr. Rennan Pereira de Gusmão**  
Examinador Externo  
UAEM/CTR/UAEM/UFCG



---

**Dr. Tony Herbert Freire de Andrade**  
Examinador Externo  
UAEM/CCT/UFCG

## **DEDICATÓRIA**

A minha mãe (Dalvanete) e meu padrasto (Mozart) pelo amor incondicional dedicado a mim.

A minha noiva (Emanoelle) pela compreensão, incentivo e apoio.

A minha Irmã (Vanessa) pelo apoio dado a mim.

A toda minha família e amigos pelo apoio.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pelas bênçãos concedidas durante minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima pela oportunidade, paciência, orientação, ensinamentos e amizade que possibilitaram a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Tony Herbert Freire de Andrade, pelos ensinamentos, orientações, sugestões e amizade cedida a mim durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais Dalvanete e Mozart pelo amor e confiança. Aos amigos Robson Queiroz, Balbina Correia, Wanessa Rafaela, Vera, Mirênia Kalina e Hugo Amorim, pela amizade, companheirismo e colaboração.

À minha noiva Emanuelle Rodrigues, minha grande companheira, por está ao meu lado nos momentos alegres e difíceis da minha vida, sempre me apoiando e aconselhando na minha jornada de me tornar um ser humano melhor. Obrigado pela inestimável colaboração.

Agradeço ao CNPq, CAPES, FINEP e a UFCG, pelo apoio financeiro e técnico na realização desse trabalho. Aos professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da UFCG.

*“Quanto mais aumenta nosso conhecimento,  
mais evidente fica nossa ignorância”.*

John F. Kennedy

## RESUMO

BRANDAO, V. A. A. *Resfriamento e congelamento de sólidos com forma complexa via técnica da fluidodinâmica computacional. Estudo de caso: pedúnculo do caju*. Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Campina Grande. 2016. 137 p. Dissertação (Mestrado).

O caju é uma fruta com elevado valor nutritivo e de grande importância econômica na região Nordeste do Brasil, porém, é altamente perecível. Existem diversos métodos de conservação, sendo o congelamento um dos mais eficientes, que permite a estocagem do alimento por longos períodos de tempo, mantendo suas características originais. O estudo numérico do processo de congelamento é de grande importância para sua otimização. O objetivo desse trabalho foi estudar o processo de resfriamento e congelamento de sólidos com forma complexa. Ênfase é dada ao pedúnculo do caju. Foram realizados experimentos em refrigerador e simulação via *software* Ansys CFX® para se obter as cinéticas de resfriamento e congelamento do produto. Resultados das cinéticas de resfriamento e congelamento, e distribuição de temperatura no pedúnculo do caju em diferentes condições operacionais: teor de umidade do produto (80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%), e velocidade do ar de resfriamento (1 m/s, 5 m/s e 10 m/s), são apresentados e analisados. O modelo prediz a temperatura inicial de congelamento e o tempo de resfriamento com boa precisão, mas não foi capaz de prever o período de pós-congelamento. Verificou-se que a variação do teor de umidade inicial teve pouca influência no tempo total de resfriamento, que as amostras com maiores teores de umidade apresentaram um resfriamento mais intenso durante o período do resfriamento e menos intenso durante o período de congelamento, que uma variação na velocidade do ar de 1 m/s para 5 m/s reduziu o tempo de resfriamento na ordem de 30%, e que ao se variar a velocidade de 5 m/s para 10 m/s, reduziu o tempo de resfriamento de aproximadamente 9%

### *Palavras Chave:*

Fruta, conservação, experimentos, simulação, CFX



## ABSTRACT

BRANDAO, V. A. A. *Cooling and freezing of solids with complex form using computational fluid dynamics technique. Case study: cashew apple.* Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Campina Grande. 2016. 137 p. Dissertação (Mestrado).

Cashew is a fruit with high nutritional value and great economic importance in the Northeast region of Brazil, however, it is highly perishable. There are several methods of conservation, being the freezing of the most efficient, which allow food storage for long time, maintaining its original characteristics. The numerical study of the freezing process is of great importance for the optimization of the process. The objective of this work was to study the cooling and freezing process with particular reference to cashew apple. Experiments were performed in refrigerator and simulation using Ansys CFX<sup>®</sup> software for obtain the cooling and freezing kinetics of the product. Result of the cooling and freezing kinetics, and temperature distribution inside the cashew apple under different operating conditions: moisture content of the product (80%, 82%, 84%, 86%, 88% and 90%), and air cooling velocity (1 m/s, 5 m/s and 10 m/s) are presented and analyzed. The model was able to predict initial freezing point temperature and cooling time with good accuracy, but was not able to predict the post-freeze period. It was found that variation in the moisture content had small influence on the cooling time, and that samples with higher moisture content showed a more intense cooling during the cooling period and less intense during the freezing period. A cooling time reduction of approximately 30% was observed when air velocity ranged from 1 m/s to 5 m/s, and from about 9% as this parameter ranged from 5 m/s to 10 m/s.

Key Words:

Fruit, conservation, Experiments, simulation, CFX

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Cajueiro comum com idade entre 70 e 80 anos, com altura estimada em 17 metros e diâmetro da copa em 24 metros.....	30
Figura 2.2: Cajueiro anão precoce 'CCP 76' com 6,5 anos de idade, com altura média de 1,8 metros e diâmetro médio da copa de 3,7 metros. ....	30
Figura 2.3: A) Castanha de caju com a amêndoa em seu interior; B) Camadas da castanha de caju.....	31
Figura 2.4: Castanha e pedúnculo do caju, e suas respectivas frações mássicas....	32
Figura 2.5: Etapas da floração e início da frutificação do cajueiro. ....	34
Figura 2.6: Crescimento da castanha. ....	35
Figura 2.7: Desenvolvimento do caju. . ....	36
Figura 2.8: Maturação completa do caju. ...	36
Figura 2.9: Curvas de crescimento da castanha e do pedúnculo de caju, a partir da fecundação da flor até a colheita. ....	37
Figura 2.10: Cajus com pedúnculos de diferentes colorações. ....	38
Figura 2.11: Produtos obtidos no processamento do pedúnculo. A) Caju ameixa, B) Polpa de caju pasteurizada congelada, C) Doce de caju em calda, D) Cajuína. ....	41
Figura 2.12: Curvas da variação da temperatura em função do tempo, típicas de congelamento rápido e congelamento lento. ....	50
Figura 2.13: Curva típica de congelamento de um produto alimentício. ....	51
Figura 2.14: a) Curva de congelamento; b) Variação da taxa de congelamento de um produto alimentício (starch gel). Medida de temperatura no centro do produto. ....	52

Figura 2.15: Etapas diretas da simulação computacional utilizando o ANSYS CFX®.	69
.....	69
Figura 3.1: Configuração do experimento. ...	72
Figura 3.2: Comparativo dos perfis: A) a partir da amostra 3, B) reproduzido no ambiente computacional. ....	74
Figura 3.3: A) Estrutura para a criação da geometria 3D; B) Sólido 3D.....	75
Figura 3.4: A) Malha computacional do pedúnculo do caju B) Vista da seção transversal da malha na região central da geometria.....	75
Figura 4.1: Cinética de congelamento do pedúnculo do caju, amostras 1, 2, 3 e média.....	84
Figura 4.2: Cinética de congelamento do pedúnculo do caju, amostras 4, 5, 7 e média.....	84
Figura 4.3: Curva de congelamento do pedúnculo do caju e sua derivada mostrando as temperaturas e tempos inerentes do processo..	86
Figura 4.4: Comparativo entre a simulação para o coeficiente de convecção de 6,94 W/ m <sup>2</sup> K e dos dados experimentais..	94
Figura 4.5: Comparativo dos dados experimentais com a simulação com diferentes coeficientes de convecção.....	95
Figura 4.6: Gráficos comparativos entre a simulação para o coeficiente de convecção de 6,42 W/ m <sup>2</sup> K e dos dados experimentais.....	96
Figura 4.7: Comparativo da derivada da curva de congelamento da experimentação e simulação..	96
Figura 4.8: Curva de congelamento numérica e sua derivada mostrando T <sub>cr</sub> e t <sub>r</sub> ... ..	98
Figura 4.9: Perspectiva tridimensional dos planos 1, 2, 3 e 4.....	99
Figura 4.10: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo t <sub>1</sub> =1000s.. .....	100
Figura 4.11: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo t <sub>2</sub> =4200s.. .....	100
Figura 4.12: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo t <sub>3</sub> =6470s.. .....	101
Figura 4.13: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo t <sub>4</sub> =10000s.. ....	101
Figura 4.14: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo t <sub>5</sub> =15000s.. ....	102
Figura 4.15: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo t <sub>6</sub> =20000s.. ....	102
Figura 4.16: Comparativo das curvas de congelamento para a velocidade do ar de 1 m/s e os teores de umidade de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%.....	106
Figura 4.17: Comparativo das curvas de congelamento para a velocidade do ar de 5 m/s e os teores de umidade de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%.....	106

Figura 4.18: Comparativo das curvas de congelamento para a velocidade do ar de 10 m/s e os teores de umidade de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%.....	107
Figura 4.19: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 1 m/s e teor de umidade de 80%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	108
Figura 4.20: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 1 m/s e teor de umidade de 82%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	108
Figura 4.21: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 1 m/s e teor de umidade de 84%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	109
Figura 4.22: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 1 m/s e teor de umidade de 86%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	109
Figura 4.23: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 1 m/s e teor de umidade de 88%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	110
Figura 4.24: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 1 m/s e teor de umidade de 90%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	110
Figura 4.25: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 5 m/s e teor de umidade de 80%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	111
Figura 4.26: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 5 m/s e teor de umidade de 82%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	111
Figura 4.27: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 5 m/s e teor de umidade de 84%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	112
Figura 4.28: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 5 m/s e teor de umidade de 86%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	112
Figura 4.29: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 5 m/s e teor de umidade de 88%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	113
Figura 4.30: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 5 m/s e teor de umidade de 90%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	113
Figura 4.31: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 10 m/s e teor de umidade de 80%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	114
Figura 4.32: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 10 m/s e teor de umidade de 82%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	114
Figura 4.33: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 10 m/s e teor de umidade de 84%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	115
Figura 4.34: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 10 m/s e teor de umidade de 86%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	115

Figura 4.35: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 10 m/s e teor de umidade de 88%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	116
Figura 4.36: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 10 m/s e teor de umidade de 90%, mostrando $T_{cr}$ e $t_r$ .....	116
Figura 4.37: Comparativo das curvas $dT/dt$ para o teor de umidade de 80% e velocidade do ar variando em 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s... ..	119
Figura 4.38: Comparativo das curvas $dT/dt$ para o teor de umidade de 82% e velocidade do ar variando em 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s... ..	119
Figura 4.39: Comparativo das curvas $dT/dt$ para o teor de umidade de 84% e velocidade do ar variando em 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s... ..	120
Figura 4.40: Comparativo das curvas $dT/dt$ para o teor de umidade de 86% e velocidade do ar variando em 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s... ..	120
Figura 4.41: Comparativo das curvas $dT/dt$ para o teor de umidade de 88% e velocidade do ar variando em 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s... ..	121
Figura 4.42: Comparativo das curvas $dT/dt$ para o teor de umidade de 90% e velocidade do ar variando em 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s... ..	121
Figura 4.43: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_1 = 500s$ , para $X' = 80%$ e $V = 1$ m/s... ..	123
Figura 4.44: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_1 = 500s$ , para $X' = 90%$ e $V = 1$ m/s... ..	123
Figura 4.45: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_2 = 1000s$ , para $X' = 80%$ e $V = 1$ m/s... ..	124
Figura 4.46: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_2 = 1000s$ , para $X' = 90%$ e $V = 1$ m/s... ..	124
Figura 4.47: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_3 = 1500s$ , para $X' = 80%$ e $V = 1$ m/s... ..	125
Figura 4.48: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_3 = 1500s$ , para $X' = 90%$ e $V = 1$ m/s... ..	125
Figura 4.49: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_4 = 2000s$ , para $X' = 80%$ e $V = 1$ m/s... ..	126
Figura 4.50: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_4 = 2000s$ , para $X' = 90%$ e $V = 1$ m/s... ..	126
Figura 4.51: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_5 = 3000s$ , para $X' = 80%$ e $V = 1$ m/s... ..	127

Figura 4.52: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_5 = 3000s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 1 \text{ m/s}$ ...	127
Figura 4.53: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_6 = 4000s$ , para $X' = 80\%$ e $V = 1 \text{ m/s}$ ...	128
Figura 4.54: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_6 = 4000s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 1 \text{ m/s}$ ...	128
Figura 4.55: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_1 = 500s$ , para $X' = 80\%$ e $V = 5 \text{ m/s}$ ...	129
Figura 4.56: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_1 = 500s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 5 \text{ m/s}$ ...	130
Figura 4.57: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_2 = 1000s$ , para $X' = 80\%$ e $V = 5 \text{ m/s}$ ...	130
Figura 4.58: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_2 = 1000s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 5 \text{ m/s}$ ...	131
Figura 4.59: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_3 = 1500s$ , para $X' = 80\%$ e $V = 5 \text{ m/s}$ ...	131
Figura 4.60: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_3 = 1500s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 5 \text{ m/s}$ ...	132
Figura 4.61: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_4 = 2000s$ , para $X' = 80\%$ e $V = 5 \text{ m/s}$ ...	132
Figura 4.62: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_4 = 2000s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 5 \text{ m/s}$ ...	133
Figura 4.63: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_5 = 3000s$ , para $X' = 80\%$ e $V = 5 \text{ m/s}$ ...	133
Figura 4.64: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_5 = 3000s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 5 \text{ m/s}$ ...	134
Figura 4.65: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_6 = 4000s$ , para $X' = 80\%$ e $V = 5 \text{ m/s}$ ...	134
Figura 4.66: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_6 = 4000s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 5 \text{ m/s}$ ...	135
Figura 4.67: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_1 = 500s$ , para $X' = 80\%$ e $V = 10 \text{ m/s}$ ...	136
Figura 4.68: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_1 = 500s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 10 \text{ m/s}$ ...	136

Figura 4.69: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_2 = 1000s$ , para $X' = 80\%$ e $V = 10 \text{ m/s}$ ...	137
Figura 4.70: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_2 = 1000s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 10 \text{ m/s}$ ...	137
Figura 4.71: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_3 = 1500s$ , para $X' = 80\%$ e $V = 10 \text{ m/s}$ ...	138
Figura 4.72: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_3 = 1500s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 10 \text{ m/s}$ ...	138
Figura 4.73: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_4 = 2000s$ , para $X' = 80\%$ e $V = 10 \text{ m/s}$ ...	139
Figura 4.74: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_4 = 2000s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 10 \text{ m/s}$ ...	139
Figura 4.75: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_5 = 3000s$ , para $X' = 80\%$ e $V = 10 \text{ m/s}$ ...	140
Figura 4.76: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_5 = 3000s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 10 \text{ m/s}$ ...	140
Figura 4.77: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_6 = 4000s$ , para $X' = 80\%$ e $V = 10 \text{ m/s}$ ...	141
Figura 4.78: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo $t_6 = 4000s$ , para $X' = 90\%$ e $V = 10 \text{ m/s}$ ...	141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Principais características dos cajueiros, comum e anão precoce. ....	29
Tabela 2.2: Tabela da produção brasileira de castanha de caju (em toneladas) .....	33
Tabela 2.3: Composição química do pedúnculo de caju. ....	39
Tabela 2.4: Resumo de pesquisas que buscam o aproveitamento do bagaço de caju na alimentação humana.....	42
Tabela 2.5: Modelos de predição do tempo de congelamento e resfriamento. ....	66
Tabela 3.1: Medições das amostras do pedúnculo do Caju .....	71
Tabela 3.2: Regras que as propriedades termofísicas foram submetidas .....	80
Tabela 4.1: Temperaturas e tempos inerentes ao processo de congelamento das amostras de pedúnculo de caju .....	86
Tabela 4.2: Calor específico de frutas variadas.....	90
Tabela 4.3: Dados das propriedades termofísicas do pedúnculo do caju utilizados na simulação .....	91
Tabela 4.4: Dados utilizados para obter o coeficiente de convecção pela correlação de Churchill.....	93
Tabela 4.5: Dados utilizados para obter o coeficiente de convecção pela correlação de Whitaker .....	104
Tabela 4.6: Variação das propriedades termofísicas do pedúnculo do caju em função do teor de umidade.....	105
Tabela 4.7: Temperaturas inicial de congelamento e tempo de resfriamento para as amostras com velocidade do ar de 1 m/s e teores de umidade de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90% .....	117



Tabela 4.8: Temperaturas inicial de congelamento e tempo de resfriamento para as amostras com velocidade do ar de 5 m/s e teores de umidade de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90% .....	117
Tabela 4.9: Temperaturas inicial de congelamento e tempo de resfriamento para as amostras com velocidade do ar de 10 m/s e teores de umidade de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90% .....	117

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$ - Difusividade do ar	$\text{m}^2/\text{s}$
$\beta$ - Coeficiente de expansão	$1/\text{K}$
$C_p$ - Calor específico	$\text{J} / \text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$
$C_{pv}$ - Calor específico volumétrico	$\text{J} / \text{cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$
D - Diâmetro da esfera	m
dT/dt - Taxa de variação a temperatura no tempo	$^\circ\text{C} / \text{s}$
exp – Exponencial	-
$f_s$ = Fração de sólido formada durante a fase de congelamento	-
g - Gravidade	$\text{m}/\text{s}^2$
<hr/>	
$h$ ou $\bar{h}_D$ – Coeficiente convectivo de transferência de calor	$\text{W} / \text{m}^2 \text{ K}$ $\text{W} / \text{m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$
<hr/>	
$k$ - Condutividade térmica	$\text{W} / \text{m} \text{ } ^\circ\text{C}$
ln – Logaritmo neperiano	-
log – Logaritmo	-
LS – Calor latente de solidificação	$\text{J}/\text{kg}$
$\bar{N}u_D$ - Número de Nusselt	-
$\rho$ – Densidade	$\text{kg} / \text{m}^3$
Pr - Número de Prandtl	-
$q'''$ - Termo de geração de energia	$\text{J} / \text{m}^3 \text{ s}$
$Ra_D$ - Número de Rayleigh	-
$Re_D$ - Número de Reynolds	-
<hr/>	
T – Temperatura	$^\circ\text{C}$ K
<hr/>	
t – Tempo	s

$\mu$ - Viscosidade dinâmica do ar	kg / s m
$\nu$ - Viscosidade cinemática do ar	m <sup>2</sup> / s
$V$ - Velocidade do ar	m/s
$X$ - Teor de umidade em base seca	-
$X'$ - Teor de umidade em base úmida	-
$\nabla$ - Operador grad	-

### **Subscrito**

- 1 – Inicial do produto
- 2 – Final do produto
- a – água pura
- c – Congelamento
- cr – Inicial de congelamento ou criogênica
- f – Final de congelamento
- pc – Pós-congelamento
- r – Resfriamento
- s – Superficial
- $\infty$  – Meio refrigerante

### **Abreviações**

LCC - Líquido da Casca da Castanha

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	22
INTRODUÇÃO.....	22
CAPÍTULO 2.....	27
REVISÃO DA LITERATURA.....	27
2.1 O Cajueiro.....	27
2.2 O Caju.....	31
2.2.1 O Fruto.....	31
2.2.2 O Desenvolvimento Fenológico do Caju.....	34
2.2.3 O Pedúnculo do Caju.....	37
2.3 Emprego do Frio na Conservação dos Alimentos.....	44
2.3.1 O Congelamento.....	48
2.3.2 As Cinéticas de Resfriamento, Congelamento e Pós-Congelamento.....	51
2.3.3 Fatores que Influenciam a Taxa de Transferência de Calor.....	54
2.3.4 Tecnologia de Congelamento.....	54
2.3.4.1 Congeladores Mecânicos.....	56
2.3.4.2 Congeladores Criogênicos.....	59
2.4 Parâmetros Termofísicos.....	59
2.4.1 Densidade.....	60
2.4.2 Condutividade Térmica.....	60
2.4.3 Calor Específico.....	60
2.4.4 Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor.....	61
2.5 Modelagem Matemática.....	61

2.5.1 Métodos analíticos e empíricos .....	62
2.5.2 Métodos numéricos.....	63
2.6 Fluidodinâmica Computacional .....	67
2.6.1 <i>Software</i> ANSYS CFX.....	68
CAPÍTULO 3.....	70
MATERIAIS E MÉTODOS .....	70
3.1 Metodologia experimental da cinética de congelamento do pedúnculo do caju ..	70
3.2 Metodologia da análise computacional.....	73
3.2.1 Construção da geometria .....	73
3.2.2 Geração da malha .....	75
3.3 Modelagem matemática .....	76
3.4 Condições iniciais e de contorno .....	78
3.5 Convecção forçada .....	79
3.6 Propriedades termofísicas.....	80
CAPÍTULO 4.....	83
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	83
4.1 Experimentais .....	83
4.2 Teóricos .....	88
4.2.1 Propriedades termofísicas .....	88
4.2.1.1 Densidade.....	88
4.2.1.2 Calor específico .....	89
4.2.1.3 Calor Latente .....	90
4.2.1.4 Condutividade térmica .....	90
4.2.2 Coeficiente de transferência de calor por convecção .....	92
4.2.3 Perfis de Temperatura .....	98
4.2.4 Influência do teor de umidade e do coeficiente de convecção no processo de congelamento .....	103
CAPÍTULO 5.....	143
CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	143
5.1 Conclusões .....	143
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	147

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Frutas em geral, são alimentos consumidos em todo o mundo por serem ricas em nutrientes essenciais na dieta humana, tais como: vitaminas A, C, E, sais minerais, fibras alimentares, carboidratos, entre outros. Segundo dados divulgados em 2012 pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), estima-se que no mundo foram produzidos cerca de 800 milhões de toneladas de frutas, em área de aproximadamente 61,4 milhões de hectares. Sendo que três países respondem pela oferta de quase 50% da produção mundial de frutas frescas. Os três maiores produtores de frutas do mundo são China, Índia e Brasil, e suas produções no ano de 2012 foram de 227,5 milhões de toneladas, 72,5 milhões de toneladas e 41 milhões de toneladas, respectivamente (TREICHEL *et al.*, 2016).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de frutas. As espécies frutíferas aqui produzidas somam em torno de 500 variedades, das quais 220 são só de plantas nativas na Amazônia legal. Favorecido pela extensão territorial, pela posição geográfica, pelo solo e pelas condições climáticas, o País produz frutas tropicais, subtropicais e temperadas (TREICHEL *et al.*, 2016). Segundo a FAO (2012), as principais culturas produzidas no Brasil em 2012 são as de laranja, banana, coco,

abacaxi, melancia, caju, mamão, uva, maçã e manga, sendo as culturas de laranja e banana juntas, responsáveis por aproximadamente 60% da produção total de frutas do país.

O País também se destaca como um dos principais produtores mundiais de castanha de caju. Com base nas estatísticas mais recentes da FAO, há produção de castanha de caju em 30 países ao redor do mundo. Entretanto, Vietnã, Índia, Brasil, Nigéria e Costa do Marfim apresentam valores mais expressivos. Estima-se que, atualmente, a soma de suas produções representa mais de 85% da produção mundial (ARAÚJO, 2013).

O caju é formado por um pedúnculo, ou pseudofruto, que se forma junto à castanha, o verdadeiro fruto. O pedúnculo é a parte comestível *in natura* do caju (FUNDAÇÃO BANCO DO BRASIL, 2016). No mercado nacional, o caju tem sido pouco explorado, em razão da facilidade com que o mercado externo absorve quase toda a produção dos dois principais produtos obtidos da castanha, que são a amêndoa e o líquido da casca de castanha (LCC), enquanto o pedúnculo de caju pode gerar uma série de outros produtos como o pedúnculo desidratado, a farinha de caju, o suco, doces, passas, entre outros, não se tem dado a devida importância (MARQUES, 2006). Assim, apesar de os produtos derivados do cajueiro terem grande potencial de gerar novas receitas, as atividades relacionadas com a cadeia produtiva da amêndoa da castanha de caju é que têm dado sustentação econômica e social ao agronegócio caju brasileiro (ARAÚJO, 2013).

A importância econômica e social do cajueiro no Brasil acontece na região Nordeste, principalmente nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Piauí (ARAÚJO, 2013). Conforme dados do IBGE (2010), a região nordeste foi responsável em 2010 por 97,25% da produção brasileira de castanha de caju.

Uma grande dificuldade enfrentada pelos fruticultores é a conservação dos frutos maduros, pois grande parte da colheita é desperdiçada e estima-se uma percentagem de 40 % de perdas entre a colheita no campo até consumidor. Este índice de desperdício é responsável pelo preço das frutas para o consumidor final (MELONI, 2006). No caso do pedúnculo do caju, essa situação é ainda pior. O aproveitamento

industrial do caju visa, basicamente, o beneficiamento da castanha e, em menor escala o aproveitamento do pedúnculo. Mesmo considerando o aproveitamento do pedúnculo sob a forma de sucos, doces, geleias, néctares, farinhas e fermentados, só 15% da produção do pedúnculo é utilizada. Uma das causas para esse baixo aproveitamento está relacionada ao tempo de deterioração do pedúnculo, que ocasiona excessivas perdas no campo e na indústria (CAMPOS *et al.*, 2005).

O pedúnculo do caju tem como característica a elevada perecibilidade após a colheita, principalmente em temperatura ambiente. Esse fato torna o emprego de técnicas pós-colheita uma pratica essencial, permitindo a extensão da vida útil do pedúnculo o suficiente para a distribuição, comercialização e consumo. Alguns fatores pré-colheita<sup>1</sup> e pós-colheita são determinantes para esse aumento de vida útil. Esses fatores, associados a uma cadeia de frio constante, permitem que os pedúnculos, ao invés de permanecer aptos ao consumo por apenas 24 ou 48 horas à temperatura ambiente, possam ser comercializados nas regiões distantes do centro de produção, por até três semanas, dependendo do material genético utilizado (ARAÚJO, 2013).

Segundo Gava (2007), existem diversos processos ou métodos de conservação de alimentos, como a esterilização e a pasteurização, que agem diretamente, destruindo total ou parcialmente a flora microbiana. Outras lançam mão de meios que dificultam a proliferação, tais como o emprego do frio ou a redução do teor de água, diretamente como na secagem, ou indiretamente, como no emprego do sal e do açúcar. Em outras modalidades, subtrai-se o contato com o ar (embalagem a vácuo), ou lança-se mão de substâncias nocivas ao desenvolvimento microbiano (defumação, aditivos), ou ainda, submetem-se o produto a fermentações especiais, como a láctica (chucrute, picles) e a alcoólica (vinhos), que os transformam e garantem uma melhor conservação. Muitas vezes são empregados processos de conservação misto, utilizando dois os mais métodos, como nos concentrados, geleias, doces em massa, picles, leite condensado, etc.

---

<sup>1</sup> Fatores ambientais como: temperatura, umidade do ar, precipitação pluviométrica, entre outros. Fatores de manejo como: manejo do solo, irrigação, adubação, produtos químicos utilizados em pulverizações, entre outros. Além do material genético utilizado



A indústria de alimentos é altamente dependente dos processos de conservação que são baseados no abaixamento de temperatura. Esta tecnologia de conservação é considerada de grande interesse para a indústria moderna, pois permite a estocagem dos alimentos perecíveis por um longo período de tempo, mantendo as características originais do produto. (RESENDE, 2000)

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 (SILVA, 2005). O conhecimento das propriedades termofísicas como: densidade, calor específico, condutividade e difusividade térmica, são de grande importância para o dimensionamento de equipamentos utilizados para o controle dos processos que envolvem transferência de calor. (MATTOS, 2007)

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 convecção térmica, dentre outros (SILVA, 2005). O conhecimento de tais parâmetros é essencial, para um melhor planejamento e otimização de processos e sistemas de resfriamento e congelamento numa linha de produção de produtos em escala industrial.

Portanto, este trabalho tem como objetivo geral estudar o processo de resfriamento e congelamento de sólidos com forma complexa via *software* ANSYS CFX®, com particular referência ao pedúnculo do caju. Como objetivos específicos podem-se citar:

- ✓ Desenvolver um método no ambiente ANSYS CFX®, para predição do perfil de temperatura de produtos agrícolas de geometria não regular, nos processos de resfriamento e congelamento, submetido a diferentes condições de contorno;

- ✓ Apresentar um modelo matemático tridimensional transiente para simular os processos de resfriamento e congelamento de sólidos com formas geométricas irregulares, com particular referência ao pedúnculo do caju;
- ✓ Estudar numericamente a distribuição de temperatura e as cinéticas de resfriamento e congelamento do sólido ao longo do processo via ANSYS CFX®;
- ✓ Comparar os resultados experimentais e numéricos da temperatura dos sólidos a fim de validar a metodologia numérica.
- ✓ Avaliar o efeito do teor de umidade do produto na sua cinética de resfriamento e congelamento do produto;
- ✓ Avaliar o efeito do coeficiente de transferência de calor convectivo na cinética de resfriamento e congelamento do pedúnculo do caju

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1 O Cajueiro

O cajueiro pertence à família *Anacardiaceae*, que é composta por cerca de 70 gêneros e 700 espécies, distribuídas nas regiões tropical e subtropical do planeta. No Brasil, ocorrem 15 gêneros e cerca de 70 espécies constituídas por árvores e arbustos que apresentam ramos sempre providos de canais resiníferos (LIMA, 1988; CARVALHO e GAIAD, 2016).

Quanto ao gênero, o cajueiro pertence ao *Anacordium*, constituído por aproximadamente 22 espécies, sendo 21 originárias das Américas do Sul e Central e uma da Malásia (LIMA, 1988a). Dessas 22 espécies de cajueiro já relatadas, apenas são explorados comercialmente os cajueiros conhecidos como comum e o anão precoce, que pertencem à mesma espécie *Anacardium occidentale* L., de origem brasileira (BARROS, 1995).

O cajueiro é considerado uma planta nativa do Brasil, pois, quando os colonizadores aqui chegaram, já o encontraram amplamente disseminado no litoral nordestino, compondo a vegetação de praias, dunas e restingas (LIMA, 1988,

CRISOSTOMO *et al.*, 2003). Posteriormente, outras espécies de cajueiros foram encontradas e relatadas como plantas espontâneas de outros tipos de bioma brasileiro.

Devido a sua dispersão, realizada pelos colonizadores desde o século XVI (entre 1563 e 1578), o cajueiro atualmente é encontrado em diversos locais do mundo, vegetando e produzindo mesmo em condições ecológicas consideradas insatisfatórias, o que lhe caracteriza como planta com grande capacidade adaptativa (FROTA e PARENTE, 1995). Devido a essa característica de adaptação, os primeiros plantios comerciais foram explorados de forma expansiva, com o aumento da área cultivada e aplicação incipiente de tecnologia, resultando dessa forma em pomares desuniformes, de baixa produtividade e rentabilidade.

A partir de programas de melhoramento genético iniciado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Ceará (Epace) e pelo Centro Nacional de pesquisa do Caju, da Embrapa, houve aos produtores a disponibilização de genótipos de cajueiro com alto potencial de produção por unidade de área (EMBRAPA, 1991). As plantas de genótipo eram disponibilizadas via mudas clonais, apresentando, quando adultas, um porte menor em relação aos cajueiros comuns, o que favorecia a aplicação de tratamentos culturais, o adensamento e a colheita manual do pedúnculo.

Devido ao porte baixo dos clones de cajueiros, o que facilita a prática da colheita manual de caju de qualidade, o pedúnculo de caju, que até então não era aproveitado, passou a ser comercializado tanto *in natura* quanto pelas indústrias (CRISÓSTOMO *et al.*, 2003). Com a industrialização do pedúnculo, criou-se uma alternativa para a agregação de valor e geração de renda para os cajucultores do Nordeste do Brasil (PAIVA, 2010)

O cajueiro comum é o mais encontrado nas regiões produtoras, pois é a planta que foi propagada via semente desde a sua descoberta além de ser a primeira explorada comercialmente. Já o cajueiro anão precoce é oriundo de seleções fenotípicas realizadas a partir da década de 1960, sendo disponibilizado aos produtores na década de 1980. (ARAÚJO, 2013)

A Tabela 2.1 apresenta as principais características do cajueiro comum e do cajueiro anão precoce.

Tabela 2.1: Principais características dos cajueiros, comum e anão precoce.

<b>Características</b>	<b>Cajueiro comum</b>	<b>Cajueiro anão-precoce</b>
Início de produção	3° ano	1° ano
Produção econômica	8° ano	3° ano
Primeira floração	3 a 5 anos	6 a 18 meses
Período de frutificação	5 meses	7 meses
Altura da planta	Até 15 m	Até 5,4 m
Diâmetro da copa	10 a 16 m	6 a 8 m
Produção de castanha/planta/safra	0 a 100 kg	Até 43 kg
Produtividade dos pomares	220 kg/ha	1.300 kg/ha
Variação no peso da castanha	3 a 33 g	3 a 10 g
Estabilidade	12 anos	7 anos

(Fonte: MICHALEWICZ, 2011)

As Figuras 2.1 e 2.2 mostram os cajueiros comum e anão precoce, respectivamente. É evidenciável a divergência de dimensões entre os dois tipos de plantas, no qual o cajueiro comum possui dimensões notavelmente superiores ao cajueiro anão precoce.

Figura 2.1: Cajueiro comum com idade entre 70 e 80 anos, com altura estimada em 17 metros e diâmetro da copa em 24 metros. Fonte: ARAÚJO (2013)



Figura 2.2: Cajueiro anão precoce 'CCP 76' com 6,5 anos de idade, com altura média de 1,8 metros e diâmetro médio da copa de 3,7 metros. Fonte: ARAÚJO (2013)



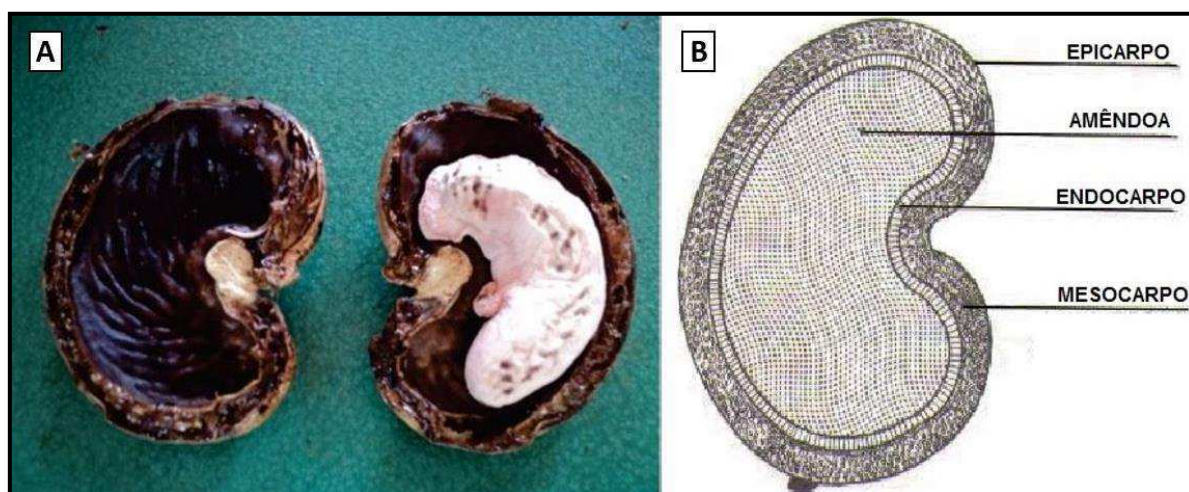
## 2.2 O Caju

### 2.2.1 O Fruto

O verdadeiro fruto do cajueiro é a castanha, um aquênio reniforme de cor marrom-acinzentada, composta pelo pericarpo e pela amêndoa (semente). O pericarpo é a casca da castanha, e é constituído por três camadas: epicarpo, mesocarpo e endocarpo (ARAÚJO, 2013).

O epicarpo é a camada mais externa, de consistência coriácea, representando cerca de 65% a 70% do peso da castanha. O mesocarpo é uma camada intermediária logo abaixo do epicarpo, apresentando aspecto esponjoso, cujos alvéolos são preenchidos por um líquido cáustico e inflamável - o líquido da casca da castanha (LCC). O endocarpo é a camada mais interna da castanha, de aspecto duro, e tem a função de proteger a amêndoa (ARAÚJO, 2013). A Figura 2.3 mostra a castanha de caju com suas respectivas camadas.

Figura 2.3: A) Castanha de caju com a amêndoa em seu interior; B) Camadas da castanha de caju. Fonte: Adaptado de ARAÚJO (2013) e MECOL (2016).

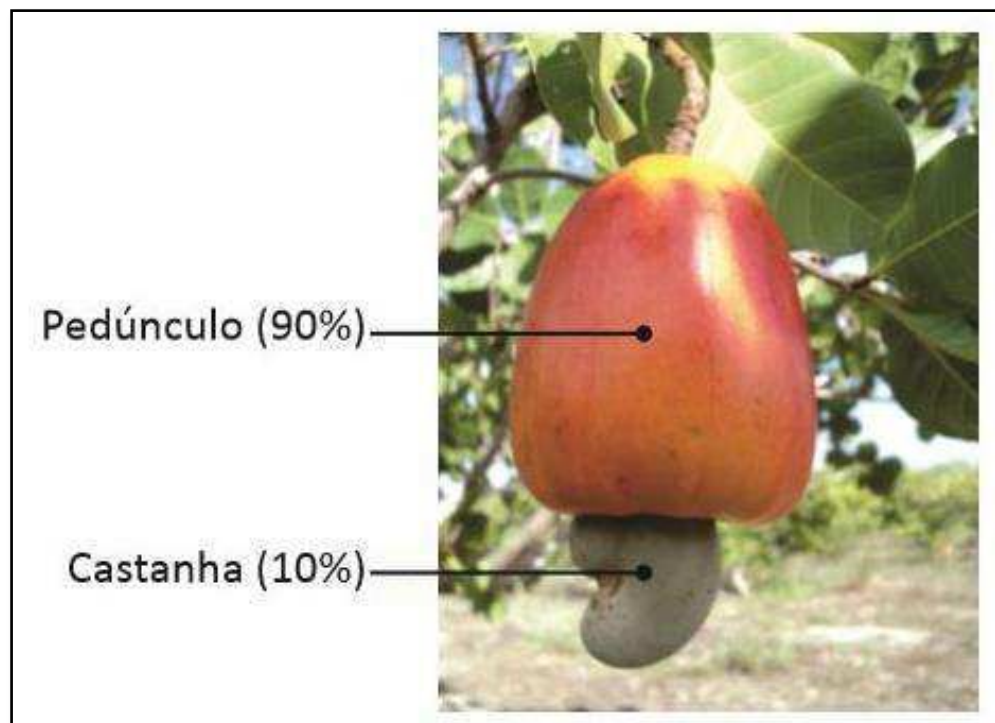


Da castanha (o fruto verdadeiro), obtêm-se a amêndoa da castanha de caju e o líquido da casca da castanha de caju. Com relação a esses produtos, merece ser destacado que o agronegócio do caju no Nordeste brasileiro surgiu como atividade econômica por ocasião da II Guerra Mundial para atender a demanda dos Estados Unidos pelo LCC, que na época constituía insumo estratégico para fabrico de tintas,

vernizes, pós de fricção, lubrificantes, isolantes elétricos, entre outras aplicações. Entretanto, o surgimento de produtos substitutos mais competitivos depois do período bélico promoveu uma drástica redução nas suas vendas (ARAÚJO, 2013).

O caju, tão popularmente conhecido como fruto, é o conjunto entre o pedúnculo (pseudofruto) e a castanha (fruto verdadeiro) (Figura 2.4). Seu nome provém do tupi, com o significado de "fruto amarelo" ou "fruta amarela de chifre" (LIMA, 1988a). O pedúnculo de caju corresponde á 90 % do peso total do fruto completo, ficando a castanha apenas com 10 % peso, mesmo sendo o pedúnculo a maior parte do fruto este é vendido por preço insignificante, sendo também utilizado como ração animal e algumas vezes seu destino é o lixo (DIAS e OLIVEIRA, 2001).

Figura 2.4: Castanha e pedúnculo do caju, e suas respectivas frações mássicas. Fonte: Adaptado de ARAÚJO (2013).



Com base nas estatísticas recentes da FAO, há produção de castanha de caju em 30 países ao redor do mundo. Entretanto, Vietnã, Índia, Brasil, Nigéria e Costa do Marfim apresentam valores mais expressivos. Estima-se que, atualmente, a soma de suas produções representa mais de 85% da produção mundial (ARAÚJO, 2013).



No Brasil, a importância socioeconômica da cadeia produtiva da amêndoa de castanha de caju destaca-se no Nordeste brasileiro, principalmente nos Estados do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte. A região Nordeste foi responsável em 2010 por 97,25% da produção brasileira de castanha de caju. Estima-se que essa cadeia produtiva faturou, em 2010, cerca de R\$ 450 milhões de reais com as vendas para os mercados externo e interno (ARAÚJO, 2013). A Tabela 2.2 mostra a produção quantitativa da castanha de caju no país entre os anos de 1990 a 2010 a partir dos dados do IBGE, assim como a produção dos principais produtores no mesmo período.

Tabela 2.2: Tabela da produção brasileira de castanha de caju (em toneladas)

<b>Ano</b>	<b>Brasil</b>	<b>Nordeste</b>	<b>Ceará</b>	<b>Rio Grande do Norte</b>	<b>Piauí</b>
<b>1990</b>	107.664	106.674	52.224	23.246	23.897
<b>1991</b>	185.965	185.938	75.888	56.430	42.964
<b>1992</b>	107.955	107.934	45.160	26.106	25.507
<b>1993</b>	77.098	77.096	22.427	10.053	29.941
<b>1994</b>	149.804	149.732	68.185	25.288	32.780
<b>1995</b>	185.229	184.897	80.896	36.053	47.207
<b>1996</b>	167.211	166.445	83.047	40.174	24.653
<b>1997</b>	125.397	123.839	48.464	33.892	22.145
<b>1998</b>	54.124	52.434	13.657	16.144	6.128
<b>1999</b>	145.437	143.530	77.113	17.898	32.224
<b>2000</b>	138.608	130.320	47.737	30.546	33.395
<b>2001</b>	124.073	121.046	67.935	16.855	18.850
<b>2002</b>	164.539	161.456	102.431	26.278	16.817
<b>2003</b>	183.094	179.856	108.051	29.089	26.662
<b>2004</b>	187.839	186.258	86.576	38.898	44.130
<b>2005</b>	152.751	150.679	66.090	41.675	24.497
<b>2006</b>	243.770	241.518	130.544	47.862	41.853
<b>2007</b>	140.675	138.200	53.420	40.408	23.744
<b>2008</b>	243.253	240.124	121.045	42.593	56.223
<b>2009</b>	220.505	217.567	104.421	48.918	42.963
<b>2010</b>	104.342	101.478	39.596	26.601	14.591

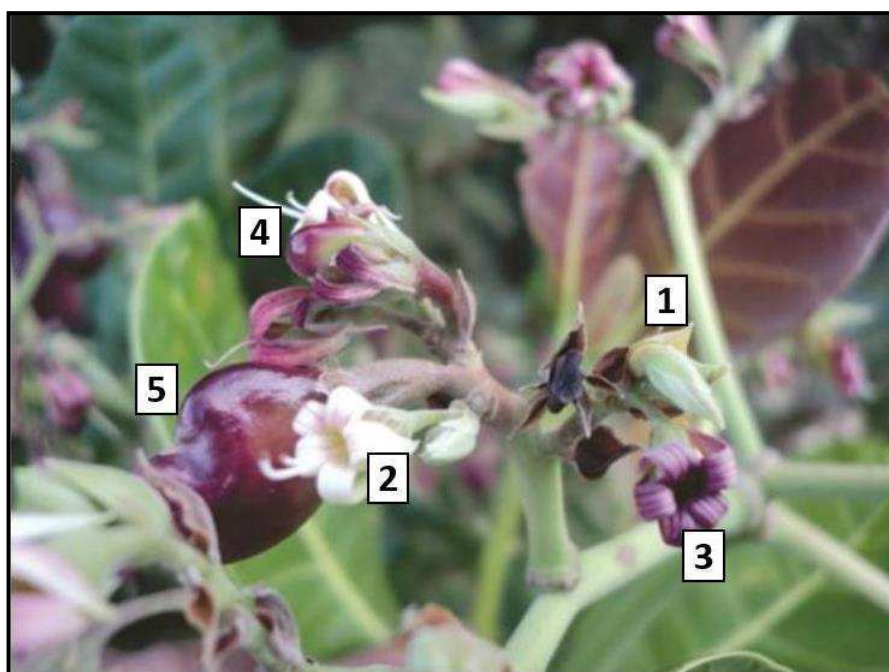
(Fonte: Adaptado de ARAÚJO, 2013)

### 2.2.2 O Desenvolvimento Fenológico do Caju

Segundo Parente *et al.* (1991) e Frota e Parente (1995), a frutificação do cajueiro ocorre normalmente na estação seca, com tendência de maior concentração de caju maduros nos meses de outubro a dezembro, com o pico ocorrendo no mês de novembro. De acordo com os autores, há uma certa antecipação do início da produção do cajueiro-anão-precoce em aproximadamente 30 dias, quando comparado ao cajueiro-comum.

Quanto ao processo de frutificação, inicia-se aproximadamente após 7 dias da fecundação da flor (BARROS, 1988). Percebe-se, então, o surgimento dos frutos jovens, chamados de maturis<sup>2</sup>. A Figura 2.5 apresenta as etapas do da floração e início da frutificação do cajueiro, onde: 1) botão floral (flor fechada); 2) flor recém-aberta, com pétalas de coloração branca; 3) flor madura, com pétalas de coloração arroxeadas; 4) flor perfeita (hermafrodita) fecundada, apresentando pedicelo arroxeadado e início do surgimento do maturi; 5) maturi em início de desenvolvimento, quando maduro, torna-se a castanha de caju.

Figura 2.5: Etapas da floração e início da frutificação do cajueiro. Fonte: Adaptado de ARAÚJO (2013).

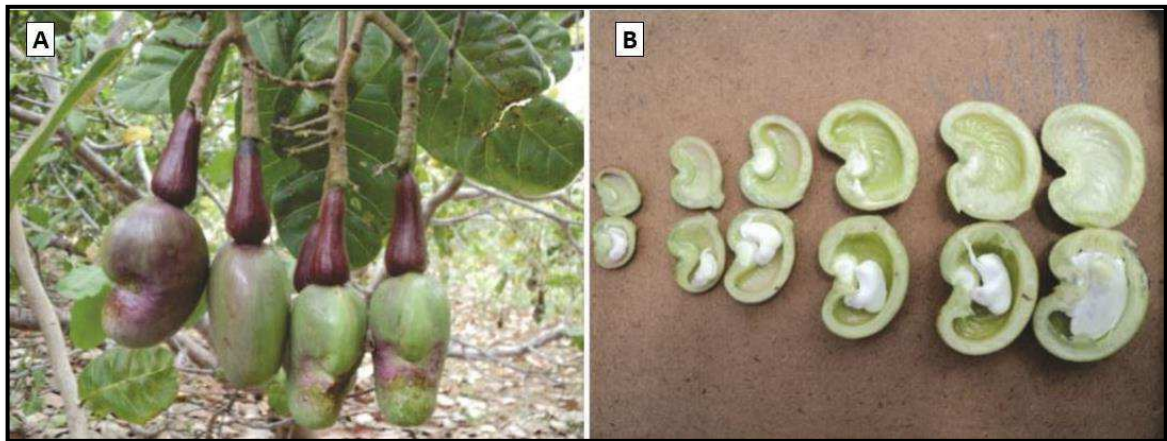


<sup>2</sup> Castanha de caju ainda verde

Detalhando o desenvolvimento do caju, tem-se, inicialmente, um crescimento rápido da castanha, a qual atinge seu máximo por volta da quinta semana (35 dias) após a fecundação da flor. A amêndoa, localizada no interior da castanha, não segue o crescimento desta, de modo que, quando a castanha já atingiu o seu tamanho máximo, a amêndoa ainda está imatura, como observado na Figura 2.6. Após a castanha atingir o máximo de tamanho, inicia-se o processo de endurecimento da casca e o desenvolvimento do embrião. Nessa fase, ocorre a diminuição do tamanho da castanha, devido à perda de umidade, estimada em até 10% na época da colheita (ALMEIDA *et al.*, 1987)

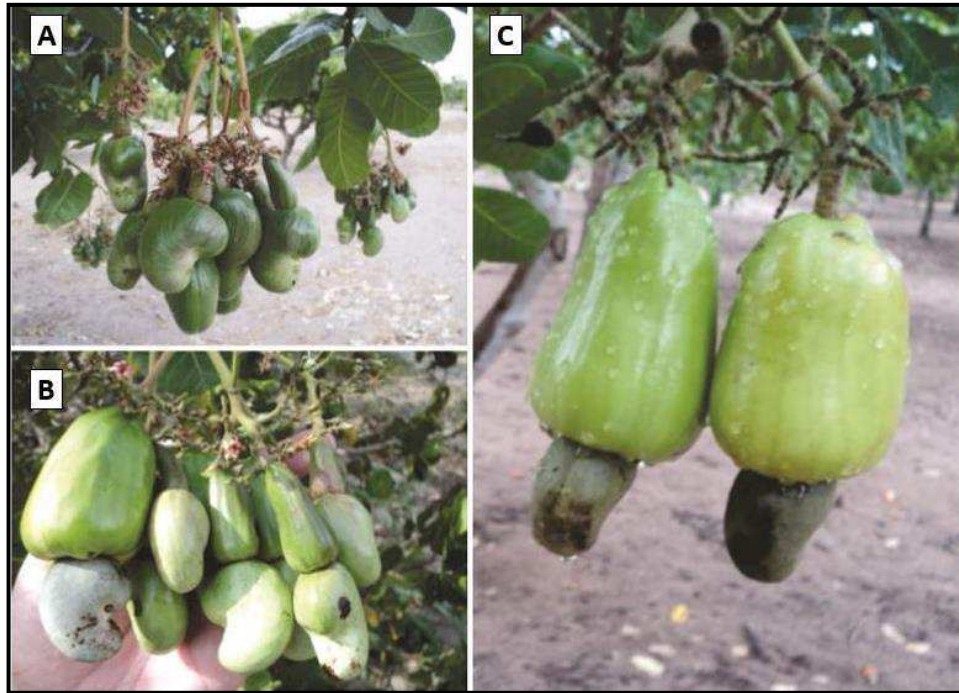
A Figura 2.6 mostra o crescimento da castanha, onde: A) rápido crescimento da castanha de caju e lento crescimento do pedúnculo do caju. B) Corte da castanha, mostrando a amêndoa ainda imatura

Figura 2.6: Crescimento da castanha. Fonte: ARAÚJO (2013).



O crescimento do pedúnculo é lento na fase inicial de desenvolvimento do caju. A partir da quinta semana após a fecundação, fase que coincide com o final do crescimento da castanha, o pedúnculo inicia um rápido crescimento até completar o seu amadurecimento. Nessa fase, o pedúnculo apresenta cerca de 85% a 89% de umidade. A Figura 2.7 mostra com detalhes essa etapa do desenvolvimento do caju, onde: A) Após o crescimento máximo da castanha; B) e C) o pedúnculo começa a se desenvolver, apresentando rápido crescimento entre o 35° e 48° dia após o surgimento do maturi.

Figura 2.7: Desenvolvimento do caju. Fonte: ARAÚJO (2013).



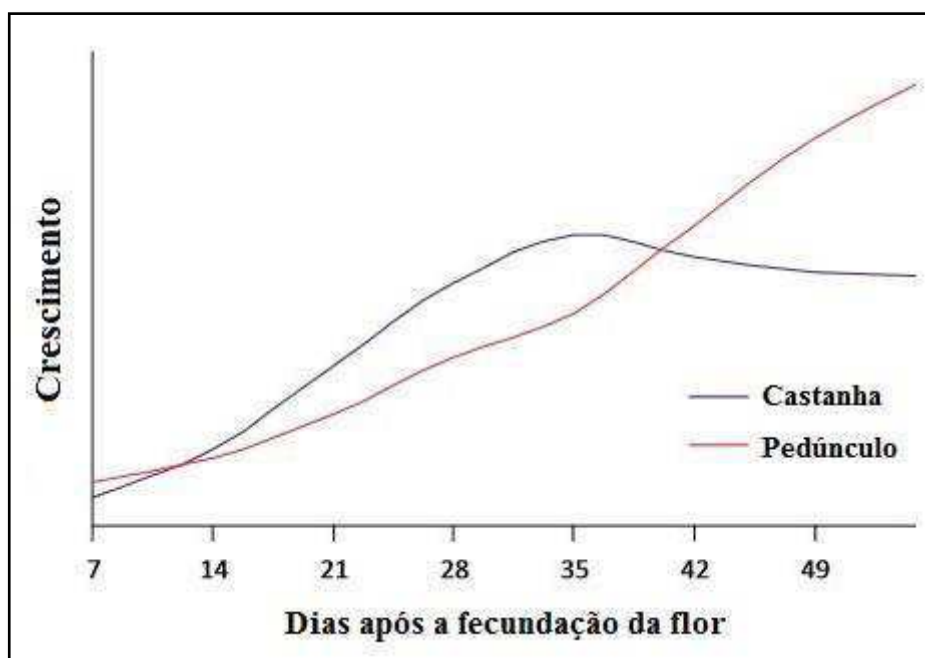
No geral, a duração do período entre o surgimento do maturi até a completa maturação do caju (pedúnculo + castanha) está em torno de 52 a 60 dias (BARROS, 1988). A Figura 2.8 exibe um caju com sua maturação completa.

Figura 2.8: Maturação completa do caju. Fonte: ARAÚJO (2013).



Almeida *et al.* (1987) conseguiu desenvolver um gráfico, conforme Figura 2.9, que retrata um possível comportamento do crescimento da castanha e do pedúnculo do caju a partir da fecundação da flor. Foi observado que o tamanho máximo da castanha ocorreu entre o 30° e o 36° dia com posterior decréscimo de 15% na época de colheita. Já o tamanho máximo do pedúnculo foi observado entre o 48° e o 52° dia (aproximadamente 7 semanas a partir da fecundação da flor).

Figura 2.9: Curvas de crescimento da castanha e do pedúnculo de caju, a partir da fecundação da flor até a colheita. Fonte: Adaptado de ALMEIDA *et al.* (1987)



### 2.2.3 O Pedúnculo do Caju

O caju é classificado como fruto que apresenta modelo de respiração não climatérico<sup>3</sup>, com baixa taxa de produção de etileno (MENEZES e ALVES, 1995). É um produto perecível com vida útil pós-colheita que não ultrapassa 48 horas; entretanto, os recentes avanços nas áreas de melhoramento genético (qualidade do

<sup>3</sup> São frutos que apresentam um declínio lento e constante de sua taxa respiratória após a colheita, independentemente do estágio de amadurecimento em que foram colhidos, devido à baixa produção de etileno. Frutos desse grupo não podem ser colhidos antes de sua maturação porque após sua colheita eles geralmente entram em processo de senescência.

pedúnculo) e de pós-colheita (armazenamento em condições controladas) vêm permitindo a ampliação da vida pós-colheita em até 15 dias, fato que está possibilitando a sua comercialização em mercados distantes do centro de produção (CRISÓSTOMO *et al.*, 2002; OLIVEIRA, 2008).

O pseudofruto do caju, é um pedúnculo hipertrofiado, carnoso, suculento, de alto valor nutricional, que apresenta grande variação de tamanho (3 até 20 cm de comprimento e de 3 até 12 cm de largura), seu peso varia de 15 a 200 gramas, apresenta diversos formatos (desde periforme, cilíndrico à fusiforme e alongado), sua coloração se apresenta amarela, alaranjada ou vermelho (LEITE, 1994; ARAÚJO, 2013). A Figura 2.10 mostra a diferença de coloração dos pedúnculos do caju.

Figura 2.10: Cajus com pedúnculos de diferentes colorações. Fonte: ARAÚJO (2013).



O caju é uma fruta que possui um elevado valor nutricional, sendo este consumido não só pelas qualidades degustativas (sabor, aroma e textura), mas, sobretudo, pelo seu elevado teor de vitamina C e minerais. Este apresenta teor de ácido ascórbico que varia de 120 a 300 mg/100g (OLIVEIRA, 2005), valores considerados altos quando comparados às doses recomendadas para ingestão diária

por pessoa, que é de aproximadamente 50 mg/dia, conforme idade e condições de saúde. Depois da acerola e do camu-camu, o pedúnculo do caju apresenta o maior teor de vitamina C dentre as frutas comestíveis de espécies cultivadas (MAIA, 2002).

A Tabela 2.3 apresenta a composição química do pedúnculo do caju, não havendo diferenciação entre os tipos de caju amarelo ou vermelho, visto que, a diferença da cor entre os caju é um atributo do tipo ou do clone, e isso não interfere sobre outras características do pedúnculo.

Tabela 2.3: Composição química do pedúnculo de caju.

<b>Componente</b>	<b>Valores médios</b>	<b>Referências</b>
Umidade (%)	88,1	Taco (2011)
°Brix <sup>4</sup>	11	Michalewicz (2011)
pH	4,2	Michalewicz (2011)
Açúcares redutores (%)	7,9	Michalewicz (2011)
Carboidratos (g/100g)	10,3	Taco (2011)
Acidez total (%)	0,36	Michalewicz (2011)
Vitamina C (mg/100g)	219,3	Taco (2011)
Taninos (%)	0,35	Michalewicz (2011)
Cálcio (mg/100g)	1	Taco (2011)
Fósforo (mg/100g)	16	Taco (2011)
Ferro (mg/100g)	0,2	Taco (2011)

(Fonte: Elaboração própria)

A sensação de “travar”, quando se prova o pedúnculo fresco de caju, é provocado por uma propriedade de alguns frutos, denominado adstringência. Essa propriedade é consequência da presença no fruto de substâncias complexas conhecidas como taninos (ARAÚJO, 2013). Apesar de apresentar conteúdo elevado de taninos, e, assim, possuir uma barreira química contra infecções por microrganismos, não apresenta resistência física à penetração (conteúdo elevado de umidade e película de revestimento bastante fina). Outro aspecto negativo que

<sup>4</sup> É uma escala numérica que mede a quantidade de sólidos solúveis em uma solução de sacarose. Uma unidade de brix corresponde a 1g de sólidos solúveis em suspensão em 100g de solução à uma determinada temperatura.

contribui para a degradação pós-colheita rápida é a elevada taxa de perda de peso durante o armazenamento, o que favorece decisivamente o murchamento acelerado (MENEZES e ALVES, 1995). Além disso, ele é altamente perecível, apresentando mecanismos aceleradores de degradação microbiológica e contribuindo, desta forma, para a rejeição ou perda de centenas de milhares de toneladas por ano do produto. (CRUZ, 1989)

A comercialização do pedúnculo do cajueiro como fruta fresca, para o consumo *in natura*, é uma conquista da cajucultura brasileira. O Brasil é o único país que possui tecnologia, experiência e hábito nesse tipo de consumo. Bem como a transformação do caju em bebidas e alimentos, o que representa mais uma oportunidade para a diversificação do negócio do caju (ARAÚJO, 2013).

A industrialização do pedúnculo do caju é uma alternativa para a geração de renda e agregação de valor para os cajucultores da região Nordeste do Brasil, o pedúnculo possui um elevado potencial de aproveitamento industrial, gerando diversos produtos tanto da sua fração líquida como de sua fração sólida. Grande parte desses produtos possui um processo de produção bem definido, porém, alguns ainda são obtidos de forma artesanal.

Segundo Paiva *et al.* (2000), os principais produtos obtidos da fração líquida do pedúnculo estão especificados a seguir:

*Suco integral*: é o principal produto do pedúnculo, sendo bem aceito no mercado interno brasileiro, especialmente na Região Nordeste.

*Néctar*: com a popularização da embalagem tetrapack, o néctar tem obtido grande aceitação, pela facilidade e forma de consumo.

*Cajuína*: produto basicamente de consumo regional, obtido do suco clarificado, tendo alguns problemas tecnológicos na sua elaboração, necessitando de estudos e padronização.



*Bebidas fermentadas e destiladas:* produzidas em pequena escala, são praticamente caseiras e os processos de obtenção também necessitam ser estudados e padronizados.

Segundo Paiva *et al.* (2000), os principais produtos obtidos da fração fibrosa do caju são:

*Polpa:* produto obtido da desintegração do pedúnculo, com vistas a sua estocagem para posterior utilização. A denominação também pode ser utilizada para polpa congelada, sendo o seu uso para a obtenção de sucos e refrescos.

*Doces:* produtos bastante conhecidos e de fácil obtenção, constituindo-se numa das formas mais rentáveis do aproveitamento da fração fibrosa. Para essa denominação se enquadram os doces pastosos, em calda e os desidratados.

A Figura 2.11 demonstra exemplos dos principais produtos obtidos no processamento do pedúnculo do caju.

Figura 2.11: Produtos obtidos no processamento do pedúnculo. A) Caju ameixa, B) Polpa de caju pasteurizada congelada, C) Doce de caju em calda, D) Cajuína. Fonte: Adaptado de ARAÚJO (2013).



O bagaço do pedúnculo é obtido após remoção da castanha e extração do suco do pedúnculo, sendo constituído pela película e polpa do pedúnculo remanescente (ARAÚJO, 2013). Ele é um resíduo agroindustrial, entretanto, possui elevado potencial para obter novos produtos industriais, pois possuem açúcares, vitaminas e sais minerais, sendo ricos em fibras e outros componentes com propriedades funcionais, além de ser fonte de polifenóis e carotenoides (ABREU, 2001). A grande preocupação da geração de resíduos industriais esta voltada para os prejuízos que eles podem gerar ao solo, água, ar e paisagem, pois, quando incorretamente gerenciados, podem tornar-se ameaça ao meio ambiente. Sendo assim, diversas pesquisas estão sendo desenvolvidas para o aproveitamento integral do pedúnculo. A Tabela 2.4 apresenta de forma resumida as principais pesquisas desenvolvidas para o aproveitamento do bagaço do caju para a alimentação humana.

Tabela 2.4: Resumo de pesquisas que buscam o aproveitamento do bagaço de caju na alimentação humana

<b>Referência</b>	<b>Forma de aproveitamento</b>	<b>Resultados</b>
Asheri <i>et al.</i> (2004)	Farinha do bagaço de caju para elaboração de pães	Alto teor de fibras e proteínas, as quais atuam na prevenção da constipação intestinal
Galvão (2006)	Hambúrguer	-
Lima <i>et al.</i> (2002)	Adição de fibra em biscoitos regionais	Na proporção de 5% e 8%, apresentaram aceitação sensorial média de 6,05 e 6,55, respectivamente (escala de 9 pontos)
Lima (2008)	Hambúrguer	Elaboração de novas formulações, com utilização de outros temperos e associação do caju com proteína de soja; pode melhorar as características nutricionais e sensoriais do produto
Lima <i>et al.</i> (2011)	Hambúrguer	Podem ser armazenados congelados (T = -18 °C/6 meses), sem prejuízo de suas qualidades físico-químicas, microbiológicas e sensoriais

Matias <i>et al.</i> (2005)	Incorporação de bagaço de caju a biscoitos tipo <i>cookie</i>	Adições de 0%, 5%, 10% e 15%, obtendo índice de aceitabilidade sensorial superior a 70%
Marques <i>et al.</i> (2008)	Pão tipo hambúrguer com adição de 10% de farinha do bagaço de caju	Produto bem aceito pelos consumidores
Pinho (2009)	Ingrediente de hambúrguer bovino	A união de carne bovina e bagaço de caju gerou um produto com boa qualidade nutricional, de elevado teor de fibra alimentar, "light" em lipídeos, com boa taxa de rendimento e menor percentual de encolhimento quando comparado a hambúrgueres bovinos convencionais
Siqueira <i>et al.</i> (2002)	Substituição parcial de carne bovina por bagaço de caju na elaboração de hambúrguer	A adição de até 10% de bagaço não causou mudanças sensoriais significativas no produto
Santana e Silva (2008)	Biscoito	Produto rico em açúcares e fibra, com alto valor nutritivo e de baixo custo econômico
Uchoa (2007)	Pó alimentício obtido do resíduo do caju para adição em biscoitos	Formulações com adição de 15% do pó apresentou média equivalente a "gostei moderadamente" no teste sensorial
Uchoa <i>et al.</i> (2008)	Pó alimentício como fonte de fibra alimentar antioxidante	Pós alimentícios obtidos de resíduos de caju são ricos em fibras e outros componentes, podendo ser aproveitados na formulação de novos produtos alimentícios (biscoitos, bolachas, pães, sopas, etc.)

(Fonte: Adaptado de ARAÚJO, 2010)

O caju é uma fruta tropical que apresenta um elevado potencial de industrialização, assim, técnicas de conservação como a desidratação osmótica, secagem, processamento mínimo e congelamento, entre outros, devem ser adotadas a fim de diminuir os índices de desperdício desse fruto.

Segundo o Ceinfo (2016) o pedúnculo do caju pode ser armazenado sob congelamento, processo esse que deve ser feito pelo método rápido, em sistema de túnel a  $-40^{\circ}\text{C}$ . A temperatura de armazenamento deve permanecer entre  $-18$  e  $-20^{\circ}\text{C}$ , evitando-se também oscilação na umidade relativa da câmara. Nessas condições, é possível aproveitar o pedúnculo por três a quatro meses, para a industrialização (cajuína, néctar e polpa). Os produtos obtidos terão nível de aceitação adequado, embora sem a mesma qualidade daqueles produzidos com o pedúnculo *in natura*.

### **2.3 Emprego do Frio na Conservação dos Alimentos**

O emprego dos meios de refrigeração já era do conhecimento humano mesmo na época das mais antigas civilizações. Pode-se citar a civilização chinesa que, muitos séculos antes do nascimento de Cristo, usava o gelo natural (colhido nas superfícies dos rios e lagos congelados e conservado com grandes cuidados em poços cobertos com palha e cavados na terra) com a finalidade de conservar o chá que consumia. As civilizações gregas e romanas também aproveitavam o gelo colhido no alto das montanhas, a custo do braço escravo, para o preparo de bebidas e alimentos gelados. Já a civilização egípcia, que devido à sua situação geográfica e ao clima de seu país não dispunha de gelo natural, refrescava a água por evaporação, usando vasos de barro, semelhantes àsoringas, tão comuns no interior do Brasil. O barro, sendo poroso, deixa passar um pouco da água contida no seu interior: a evaporação dessa água para o ambiente faz baixar a temperatura do sistema (NOBRE e LIMA, 2011).

O frio conserva o alimento pela inibição total ou parcial dos principais agentes causadores de alterações: atividade microbiológica, enzimática e metabólica dos tecidos animais e vegetais após sacrifício e colheita. A aplicação do frio pode ocorrer pelo resfriamento ou congelamento do produto fresco ou processado (ORDÓÑEZ, 2005).

A refrigeração é uma operação unitária em que através da redução da temperatura de um alimento é possível reduzir a velocidade das transformações microbiológicas e bioquímicas no mesmo, prolongando assim a sua vida útil (TOLEDO, 1991). Neste sentido, a refrigeração evita o crescimento de microrganismos termófilos (temperatura ótima de crescimento de  $45$  a  $65^{\circ}\text{C}$ ) e de

muitos mesófilos (temperatura ótima de crescimento de 25 a 40°C), dependendo da temperatura final atingida pelos produtos (FRANCO, 1996). A razão para a inibição do crescimento microbiano é que as reações metabólicas dos microrganismos são catalisadas por enzimas e a taxa de reação catalisada enzimaticamente é dependente da temperatura. Desta forma, com a redução da temperatura, ocorre uma redução na taxa de reação (JAY, 2005).

Com relação ao metabolismo, sabe-se que a cada 10° C que é elevada a temperatura, ocorre no mínimo uma duplicação das taxas das reações metabólicas de frutos, conforme a Lei de Van't Hoff (CHITARRA, 1999), e é verdade também que um decréscimo da temperatura leva a uma queda no metabolismo do produto. Sendo assim, fica clara a importância do emprego de tecnologias de resfriamento.

A refrigeração é o método mais econômico para o armazenamento prolongado de frutos e hortaliças frescos. Os demais métodos de controle de amadurecimento e das doenças são utilizados como complemento do abaixamento da temperatura. Métodos tais como controle ou modificação de atmosfera, uso de ceras na superfície dos produtos, entre outros, não produzem bons resultados, se não forem associados ao uso de baixas temperaturas (CHITARRA e CHITARRA, 1990). A diminuição da temperatura do produto ainda é um dos meios mais eficazes para a manutenção de sua qualidade, por reduzir a atividade respiratória e retardar a atividade metabólica, inibir o crescimento microbiano, os quais conduzem ao amadurecimento e/ou à senescência dos tecidos vegetais (CHITARRA e CHITARRA, 2005).

Após a colheita, os frutos mantêm muito dos seus processos vitais predominantes no momento anterior à colheita, principalmente a respiração. O processo de respiração é primordialmente um processo oxidativo, que aumenta os níveis de dióxido de carbono e água, com liberação de energia, sendo essa energia química requerida para a realização de vários processos anabólicos e catabólicos essenciais ao ser vivente. Após a colheita, o processo respiratório em frutos e hortaliças já não é tão eficiente, uma vez que não é suprido pelo processo fotossintético através das folhas. No entanto, esses órgãos vegetais produzem energia na forma de calor, quanto mais rápido o produto respira e amadurece, maior é a quantidade de calor gerado. Em geral, a taxa de respiração é mais elevada nas

primeiras 24 horas após a colheita. As perdas são maiores e a vida de armazenamento menor, quando o produto é armazenado após a colheita em ambiente com elevada temperatura e sem refrigeração (CHITARRA e CHITARRA, 1990).

Frutas *in natura* e hortaliças são compostas por tecidos vivos sujeitos a modificações contínuas após a colheita, embora algumas destas modificações sejam desejáveis sob do ponto de vista do consumidor, a maioria não o é (SILVA, 2008). As alterações indesejáveis causadas por fatores biológicos, como a respiração, a transpiração e a ação do etileno, e todas as transformações metabólicas que estão associadas à degradação das frutas e hortaliças podem ser retardadas com o uso da refrigeração controlada (PINTO e MORAIS, 2000). As qualidades não aparentes dos produtos hortícolas, como valor nutricional, textura, aroma e sabor são preservados por mais tempo desde que estes sejam submetidos à temperatura e tempo adequados. A vida útil dos produtos pós-colheita pode ser reduzida e conseqüentemente sua qualidade alterada se ocorrer retardo no resfriamento desses produtos. Contudo, deve-se evitar a exposição ao calor ou frio excessivos, visto que promovem modificações no metabolismo normal, podendo acarretar alterações indesejáveis tais como: perda de massa, danos pelo frio, perda do valor nutritivo, modificações na textura, modificações no sabor e no aroma, aumento na susceptibilidade ao ataque de microrganismos (CHITARRA e CHITARRA, 2005).

O uso do frio no processamento de alimentos age de maneira inibitória. De modo geral, as reações químicas, enzimáticas e o crescimento microbiológico são apenas inibidos com a diminuição da temperatura. Esse tipo de processamento não melhora a qualidade dos produtos, desse modo, apenas tecidos saudios e de qualidade devem ser refrigerados, uma vez que a temperatura baixa não destrói o patógeno, apenas diminui sua atividade (ORDÓÑEZ, 2005).

As funções vitais dos microrganismos são mantidas mesmo a temperaturas consideradas mínimas para o crescimento. Muitos apenas cessam a multiplicação e sobrevivem com o metabolismo reduzido, estabelecendo-se um estado de equilíbrio. Se após determinado tempo, a temperatura aumentar, tais microrganismos reiniciam a multiplicação, e o metabolismo normal se estabelece (BRASIL, 2011). Logo, o efeito do congelamento é, em muitos casos, bacteriostático e não bactericida. E esse efeito

bacteriostático que constitui a base dessa tecnologia de conservação dos alimentos (SGARBIERI, 1987).

Uma das formas do uso do frio na conservação de alimentos é o resfriamento, nesse processo o alimento tem sua temperatura reduzida para valores entre  $-1$  e  $8^{\circ}\text{C}$ . Desse modo, é possível reduzir a velocidade das transformações microbiológicas e biológicas dos alimentos, prolongando assim a sua vida útil por dias ou semanas, causando mudanças mínimas nas características sensoriais e nas propriedades nutricionais dos alimentos (TOLEDO, 1991; FELLOWS, 2006).

Outra forma de conservação de alimentos através de baixas temperaturas é pelo congelamento. Nesse método, a temperatura de um alimento é reduzida abaixo de seu ponto de congelamento e uma parte da água do alimento sofre mudança em seu estado, formando cristais de gelo (FELLOWS, 2006). Desse modo, a atividade de água do alimento é reduzida, o que proporciona o aumento da vida útil do produto. O congelamento retarda, mas não para as reações físico-químicas e bioquímicas que levam a deterioração dos alimentos, e durante o armazenamento congelado ocorre uma mudança lenta e progressiva na qualidade sensorial dos produtos alimentícios (RAHMAN e RUIZ, 2007).

Em geral, nas condições usuais de congelamento ( $-18^{\circ}\text{C}$ ), a atividade microbiana é praticamente impedida, tendo em vista que a maioria dos microrganismos não se desenvolve em temperaturas inferiores a  $-10^{\circ}\text{C}$ . Quanto mais baixas forem às temperaturas empregues nesse método de conservação de alimentos, mais lentas serão as reações químicas, a atividade enzimática e o crescimento microbiano (FREITAS e FIGUEIREDO, 2000)

Apesar do frio ser um método de conservação de alimentos, alterações indesejadas podem ocorrer aos alimentos durante o armazenamento em baixas temperaturas. Na refrigeração, esses efeitos ocorrem principalmente em frutas e hortaliças. Isso é comum quando a temperatura de armazenamento é reduzida abaixo de um valor específico ideal, que é peculiar a cada produto, e causa a chamada lesão pelo frio, resultando em diversas alterações fisiológicas como o escurecimento interno

ou externo dos alimentos, falha no amadurecimento e manchas na casca (FELLOWS, 2006).

No processo de congelamento também podem ocorrer alterações indesejadas, e essas se dão principalmente pelo congelamento lento. Nesse processo são formados grandes cristais de gelo nos espaços intercelulares, deformando e rompendo a parede celular das células adjacentes, assim, as células desidratam e sofrem um dano permanente devido ao aumento da concentração de solutos e a deformação e colapso da estrutura celular (FELLOWS, 2006).

No congelamento rápido ocorre um abaixamento brusco da temperatura e, geralmente, o processo se completa em alguns minutos. Nesse tipo de congelamento, são formados cristais de gelo menores, tanto nos espaços intracelular quanto extracelular, assim, praticamente não ocorrem alterações na qualidade do alimento, contudo, taxas de congelamento muito alta pode causar estresse em alguns alimentos, podendo resultar no rompimento ou rachadura dos alimentos (POTTER, 1995, FELLOWS, 2006).

### **2.3.1 O Congelamento**

O congelamento é uma operação unitária na qual a temperatura de um alimento é reduzida abaixo do seu ponto de congelamento e uma porção da água sofre uma mudança no seu estado formando cristais de gelo. Durante o congelamento, ocorre inicialmente a remoção do calor sensível para reduzir a temperatura do alimento para a temperatura inicial de congelamento, em seguida, ocorre a eliminação do calor latente durante a mudança de fase onde a temperatura permanece praticamente constante (FELLOWS, 2006).

Segundo LeBlanc *et al.* (1990a) o congelamento é um excelente método para manter as características de uma grande variedade de produtos alimentícios, pelo fato de paralisar as atividades enzimáticas bem como o crescimento de microrganismos, pois utiliza temperaturas mais baixas que a refrigeração, inibindo todos os processos metabólicos. O congelamento mantém as características sensoriais do alimento, entretanto, se o processo for feito de forma inadequada, o alimento pode apresentar



suas características alteradas após o descongelamento. Esse fato está relacionado com a formação de cristais de gelo (WOJSLAW, 2012).

Os alimentos crus com alto teor de umidade<sup>5</sup> possuem o ponto de congelamento entre 0 e -3,9 °C, e alimentos com baixo conteúdo de umidade possuem temperaturas de congelamento inferiores devido ao alto teor de sólidos. (RAHMAN *et al.*, 2009). Segundo Boonsupthip e Heldman (2007), a temperatura inicial de congelamento obtida experimentalmente para 200 produtos alimentícios com alto teor de umidade (>70 % água), como vegetais, carnes, frutos do mar e laticínios, variaram entre -0,1 a -3,0 °C.

Em geral os alimentos se congelam entre 0°C e -4°C, sendo assim, inferior ao ponto de congelamento da água pura devido à composição em água constituir-se em soluto de uma série de substâncias orgânicas e inorgânicas (proteínas, sais, ácidos, açúcares, entre outros). O que ocorre neste caso é o congelamento da água livre, pois a água ligada encontra-se combinada a esses diversos solutos e por isso impedida de ser congelada (WOJSLAW, 2012).

De acordo com Cavalcanti Mata *et al.* (2003) a velocidade de congelamento é um dos fatores mais importantes, visto que, de maneira geral, os produtos biológicos têm teor de água elevado, e o tamanho e a forma dos cristais de gelo dependem das velocidades de congelamento.

Segundo Fellows (2006), as altas taxas de transferência de calor produzem um grande número de núcleos e, como as moléculas de água preferencialmente migram para um núcleo já existente em vez de se formar novos núcleos, assim, o processo de congelamento rápido proporciona a formação de cristais de gelo pequenos, intracelulares, e que não provoca o rompimento das células. Além disso, sendo curto o tempo para congelamento, menor será o tempo para a difusão dos sais e para a separação da água, na forma de gelo, impedindo a formação de soluções hipertônicas no produto. Com o processo de congelamento lento, ocorre o contrário, com formação

---

<sup>5</sup> É a quantidade de água existente em um produto e pode ser expresso em base úmida ou em base seca

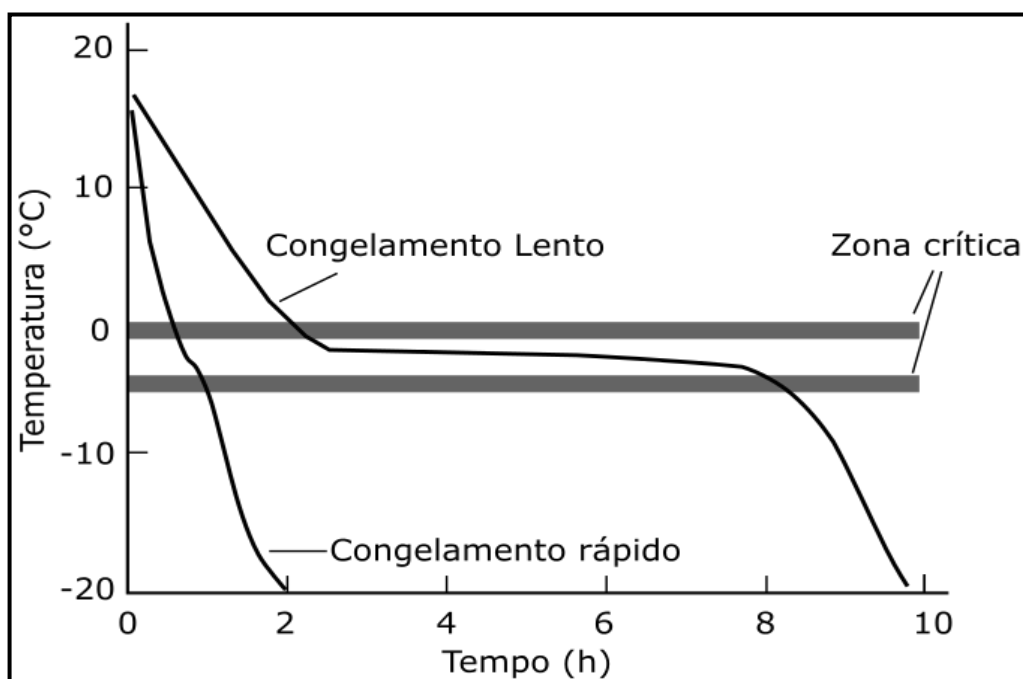
de grandes cristais de gelo que rompe as células e desorganizam totalmente a estrutura do alimento.

A taxa de crescimento do cristal é controlada pela taxa de transferência de calor durante a maior parte do platô de congelamento. O tempo requerido para que a temperatura do alimento passe pela zona crítica (congelamento) determina tanto o número quanto o tamanho dos cristais de gelo (FELLOWS, 2006).

O tempo de congelamento pode ser definido como sendo o tempo em que o centro geométrico do alimento leva para atingir certa temperatura final de congelamento (HELDMAN; LUND, 2007). A partir das curvas de congelamento, é possível determinar a temperatura inicial de congelamento, a temperatura final de congelamento, as velocidades de congelamento e os tempos de congelamento.

As curvas de congelamento também podem ser utilizadas para caracterizar o congelamento como rápido ou lento dependendo do perfil da curva obtida. As curvas apresentam perfis distintos entre os dois tipos de congelamento como é retratado na Figura 2.12, que demonstra a diferença entre a curva de congelamento lento e a curva de congelamento rápido.

Figura 2.12: Curvas da variação da temperatura em função do tempo, típicas de congelamento rápido e congelamento lento. Fonte: Adaptado de FELLOWS (2006)

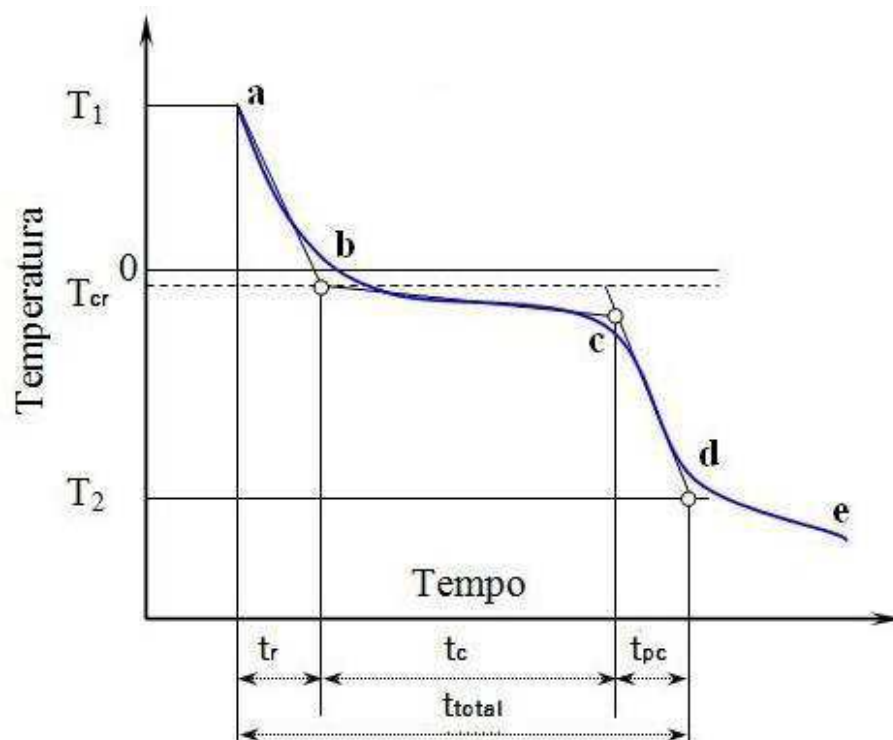


Os fatores mais importantes que podem influenciar o congelamento são a composição do alimento e as propriedades termofísicas como a densidade, entalpia, calor específico, condutividade térmica, e difusividade térmica (JIE *et al.*, 2003; RAHMAN *et al.*, 2009). Fatores externos também podem afetar o congelamento e estão relacionados com as condições físicas em que o congelamento ocorre, como a velocidade de congelamento, coeficientes de transferência de calor e de massa na superfície do alimento e o tipo de equipamento utilizado (LIND, 1991; RAHMAN *et al.*, 2009).

### 2.3.2 As Cinéticas de Resfriamento, Congelamento e Pós-Congelamento

Na Figura 2.13 tem-se representada graficamente a curva típica de congelamento de alimentos, onde:  $T_1$  e  $T_2$  – temperatura inicial e final do produto no centro;  $T_{cr}$  – Temperatura criogênica;  $t_r$  – tempo de resfriamento;  $t_c$  – tempo de congelamento;  $t_{pc}$  – tempo de pós-congelamento. O processo de redução de temperatura divide-se em três fases: resfriamento (a-b), congelamento (b-c) e pós-congelamento (c-e) (DELGADO e SUN, 2001; RAHMAN *et al.*, 2002).

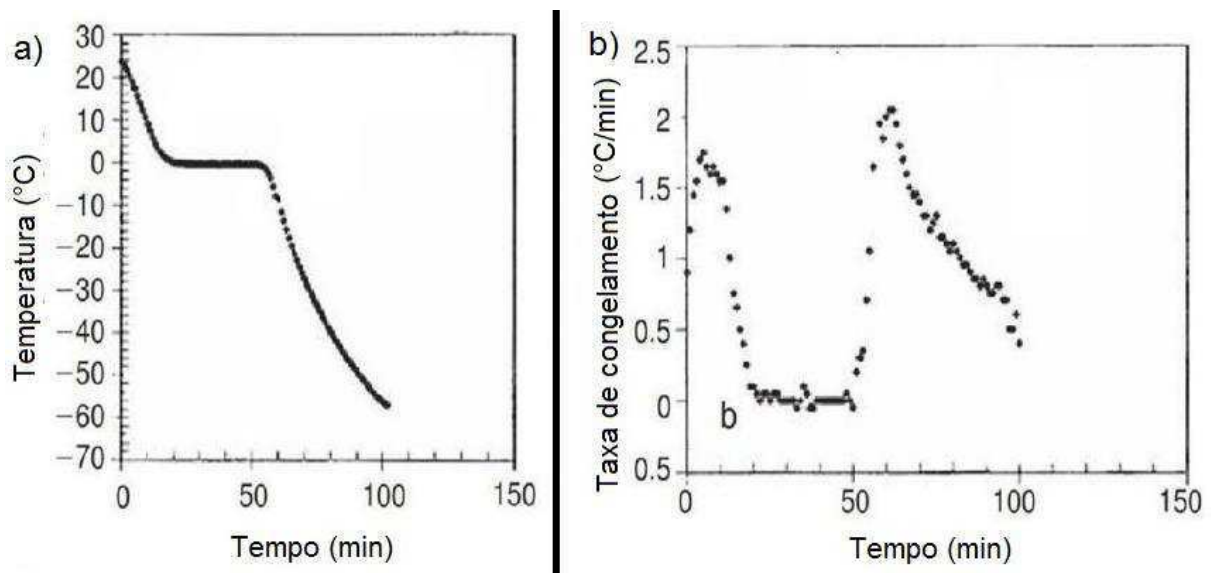
Figura 2.13: Curva típica de congelamento de um produto alimentício. Fonte: SILVA (2005)



A primeira fase, que corresponde ao tempo decorrido de  $a$  até  $b$ , 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 (SILVA, 2005).

Rahman *et al.* (2002) estudaram o método da curva de congelamento para determinar a  $T_{cr}$  e também para validar se o mesmo pode ser utilizado para determinar a temperatura final de congelamento ( $T_f$ ). No estudo foi utilizado gel de amido e solução de sacarose para testar o método com um aparato experimental de congelamento. A análise foi feita por meio da taxa de congelamento ( $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ ) durante todo o processo. Foi observado que os valores medidos de  $T_f$  pelo método da curva de congelamento são muito próximos aos valores encontrados na literatura. Na Figura 2.14 observa-se graficamente o resultado experimental obtido por esses autores.

Figura 2.14: a) Curva de congelamento; b) Variação da taxa de congelamento de um produto alimentício (starch gel). Medida de temperatura no centro do produto. Fonte: RAHMAN *et al.* (2002)



Segundo Rahman *et al.* (2002), o ponto inicial de congelamento é uma das propriedades termodinâmicas mais importantes de um alimento congelado, utilizado para estimar propriedades termofísicas devido à descontinuidade apresentada neste ponto. Essa propriedade pode ser utilizada para calcular ou determinar outras propriedades como a massa molar, atividade de água, água livre, ligada e congelada, entalpia de congelamento, e para construção de diagramas de estado (RAHMAN *et al.*, 2002; RIBERO *et al.*, 2007; RAHMAN *et al.*, 2009). Consequentemente esta propriedade é essencial nos estudos dos processos de congelamento e descongelamento dos alimentos. Além disso, o ponto de congelamento é utilizado nos modelos matemáticos para estimação do tempo de congelamento utilizando a equação de Plank ou equações similares (RAHMAN *et al.*, 2002).

Marini *et al.* (2014) estudaram o processo de congelamento e descongelamento de salsicha, mortadela e CMS<sup>6</sup> de frango em túnel de congelamento industrial. Os parâmetros do congelamento e descongelamento (tempo de congelamento e descongelamento, temperatura inicial e final de congelamento e descongelamento) foram determinados a partir das curvas de congelamento e descongelamento medidas experimentalmente em escala industrial. Foi constatado que o tempo de congelamento é influenciado pelo tipo de embalagem utilizada e a pela posição do produto dentro da embalagem. A temperatura inicial de congelamento ( $T_{cr}$ ) não variou com a posição da sonda colocada em diferentes pontos no produto, como esperado, pois a  $T_{cr}$  é uma propriedade do material.

Chen e Pan (1995) definiram as velocidades de congelamento sendo estimadas como a metade da espessura do alimento dividido pelo tempo (em horas) para a temperatura no centro geométrico do alimento diminuir de 0 a -5 °C (zona crítica com maior formação de cristais de gelo) e de 0 a -18 °C (congelamento completo). O tempo total de congelamento pode ser definido como o tempo para a temperatura central do alimento atingir uma temperatura desejada, normalmente estabelecida em -18 °C. (MARINI *et al.*, 2014).

---

<sup>6</sup> Carne Mecanicamente Separada

Cavalcanti Mata *et al.* (2003) observaram durante o congelamento do fruto de cajá, através da curva de congelamento, que na fase, correspondente ao congelamento em si do fruto, na temperatura de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o tempo de congelamento foi de 75 minutos; na temperatura  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  foi de 44 minutos e na temperatura de  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$  de 40 minutos. Os autores também perceberam que nessa mesma fase houve uma inclinação da curva, e concluíram que teoricamente não deveria existir, se o congelamento fosse lento, pois nessas condições, toda a energia seria utilizada para congelar o produto, ou seja, a energia seria utilizada para formar os cristais de gelo no interior do fruto.

### **2.3.3 Fatores que Influenciam na Taxa de Transferência de Calor**

Durante o congelamento, o calor é conduzido do interior do alimento para a superfície e removido pelo meio de congelamento (FELLOWS, 2006). Os principais fatores que influem na taxa de transferência de calor são:

- a) A condutividade térmica do alimento
- b) A área do alimento disponível para a transferência de calor
- c) A distância que o calor deve percorrer dentro do alimento (tamanho das peças de alimento)
- d) A diferença de temperatura entre o alimento e o meio de congelamento
- e) O efeito isolante da camada de ar que envolve o alimento
- f) A embalagem, se o alimento possuir, pois, constitui uma barreira adicional ao fluxo de calor

### **2.3.4 Tecnologia de Congelamento**

O projeto básico de plantas de refrigeração industrial tem sido caracterizado por apenas dois tipos de ciclos de refrigeração: o ciclo de absorção e o ciclo de

compressão de vapor (STAMM, 1984). Os dois ciclos de refrigeração trabalham com o mesmo princípio, ou seja, o calor é absorvido no evaporador que provoca a vaporização do fluido. No entanto, uma energia externa deve ser adicionada ao sistema para proporcionar esta condição de operação. A carga de energia do sistema é posteriormente rejeitada para o ambiente ou pode ser usada para fazer algum trabalho útil, conforme demonstrado por Rossi (1993), através de uma análise experimental de uma bomba de calor aplicada para a secagem de produtos alimentícios.

Os sistemas que trabalham com o ciclo de compressão de vapor obtiveram uma grande aceitação da indústria de refrigeração atual e, desta forma, são amplamente aplicados nos projetos de plantas de refrigeração industrial (RESENDE, 2000).

De forma geral, a maioria dos equipamentos de refrigeração industrial utiliza o ciclo de compressão de vapor em função da sua simplicidade, o menor custo e a maior eficiência energética. Dificilmente, uma outra tecnologia deverá apresentar características competitivas para este setor e, assim, o ciclo de compressão de vapor deve continuar sendo a tecnologia dominante na indústria de refrigeração (PEIXOTO *et al.*, 1993).

Os equipamentos de congelamento são classificados pelo método utilizado para remover o calor. Sendo classificados de forma ampla como:

- ✓ Congeladores mecânicos, que evaporam e comprimem um fluido refrigerante em um ciclo contínuo e usam ar, líquidos ou superfícies refrigeradas para remover o calor dos alimentos;

- ✓ Congeladores criogênicos, que utilizam dióxido de carbono sólido ou líquido, nitrogênio líquido (ou até pouco tempo atrás, fréon líquido) em contato direto com o alimento.

Uma classificação alternativa, baseada na taxa de movimento da frente de gelo, é dada por:

- ✓ Congeladores lentos e congeladores intensos ( $0,2 \text{ cm h}^{-1}$ ), incluindo congeladores de cabine ou a ar estático e câmaras frias;
- ✓ Congeladores rápidos ( $0,5 \text{ a } 3 \text{ cm h}^{-1}$ ), incluindo congeladores a ar forçado e de placa;
- ✓ Congeladores muito rápidos ( $5 \text{ a } 10 \text{ cm h}^{-1}$ ), incluindo congeladores de leito fluidizados;
- ✓ Congeladores ultrarrápidos ( $10 \text{ a } 100 \text{ cm h}^{-1}$ ), isto é, congeladores criogênicos.

#### **2.3.4.1 Congeladores Mecânicos**

Stoecker e Jabardo (1994) citam que o ciclo de compressão de vapor possui basicamente os seguintes componentes: o evaporador, o compressor, o condensador, os aparelhos de expansão, as tubulações de interconexão e uma variedade de componentes auxiliares. A operação deste sistema frigorífico básico é caracterizada pela retirada de calor da carga de refrigeração agregada ao evaporador, onde o refrigerante troca calor e se vaporiza. O vapor resultante é succionado pelo compressor. Então, uma quantidade de energia mecânica é adicionada ao compressor, elevando a pressão e a temperatura do gás de descarga. Este gás flui para o condensador, trocando calor com o fluido de interface do trocador de calor e sai na condição de líquido saturado ou sub-resfriado, ainda sob alta pressão. Este líquido passa posteriormente por um aparelho de expansão onde uma parte do líquido evapora instantaneamente, promovendo o resfriamento da fase líquida remanescente, além da redução de pressão do fluido que é utilizado novamente no evaporador, fechando, desta forma, o circuito termodinâmico.

A escolha do fluido refrigerante adequado para a planta de refrigeração deve ser baseada, inicialmente, na definição das condições de operação do sistema. Desta forma, pode-se identificar aqueles fluidos que apresentam as condições termodinâmicas adequadas para operar neste sistema (RESENDE, 2000).



As propriedades físicas dos refrigerantes também são importantes durante a avaliação do comportamento do fluido no sistema. Aqueles refrigerantes que apresentam um baixo ponto de ebulição são caracterizados pela manutenção de valores de pressão superiores à pressão atmosférica, mesmo quando operado na condição de baixa temperatura de evaporação. Além disso, um ciclo que rejeita calor em condições de operação acima da temperatura crítica, não permitirá a condensação do refrigerante e, portanto, as vantagens térmicas da sua mudança de fase não serão aproveitadas. Desta forma, um fluido refrigerante que apresenta uma temperatura crítica relativamente baixa é considerado adequado para as aplicações de refrigeração e de congelamento de alimentos (RESENDE, 2000).

Verifica-se, ainda, que o desempenho termodinâmico de um ciclo real depende de diversas propriedades características do fluido refrigerante. Um dos parâmetros mais importantes é o calor latente de vaporização. Ele afeta significativamente a vazão de refrigerante no circuito, onde um valor elevado do mesmo implica numa vazão reduzida do refrigerante. Um outro parâmetro importante é a vazão volumétrica de vapor na saída do evaporador que é calculada em função do volume específico do refrigerante. Ela está relacionada com o dimensionamento de tubulações e do aparelho de compressão. (RESENDE, 2000)

Os principais refrigerantes utilizados atualmente são: Freon-22 e amônia, com a possibilidade de utilização futura do propano. Entretanto, esses dois últimos são mais caros e podem causar danos localizados, necessitando, portanto, de precauções adicionais de segurança e treinamento para o usuário dos equipamentos (HEAP, 2000). O meio de resfriamento em resfriadores mecânicos pode ser ar, um fluido ou uma superfície metálica (FELLOWS, 2006).

a) *Congeladores a Ar Refrigerado*: Nos congeladores de câmara, o alimento é congelado com ar estacionário (circulação natural) entre - 20°C e - 30°C. Esse tipo de congelamento não é utilizado para congelamento comercial devido às baixas taxas de congelamento (de 3 a 72 h), o que resulta em processos economicamente pouco efetivos e em perda de qualidade do produto. Câmaras frias são utilizadas para congelar carcaças de carne, armazenar alimentos congelados por outros métodos e em salas de finalização de produtos para sorvete. O ar é geralmente circulado por

ventiladores para promover a distribuição uniforme da temperatura, mas os coeficientes de calor são baixos (FELLOWS, 2006).

Nos congeladores de ar forçado, o ar é recirculado pelos alimentos a uma temperatura entre  $-30^{\circ}\text{C}$  e  $-40^{\circ}\text{C}$  e a uma velocidade de 1,5 a  $6,0\text{ m s}^{-1}$ . O fluxo de ar pode ser paralelo ou perpendicular ao alimento e é conduzido para passar uniformemente por todas as peças de alimento. Os congeladores a ar forçado são relativamente econômicos e altamente flexíveis, permitindo o congelamento de alimentos de diferentes tamanhos e formas. O equipamento é compacto e tem um custo inicial relativamente baixo e uma alta capacidade (200 a  $1500\text{ kg h}^{-1}$ ) (FELLOWS, 2006)

Quando este processo ocorre nos equipamentos que se utilizam de esteiras, com os alimentos dispostos separadamente sobre as mesmas, ocorre o congelamento individualizado de cada partícula ou porção disposta em questão de minutos, sendo este processo então conhecido por IQF (*Individual Quick Freezing* – congelamento rápido individual) (WOJSLAW, 2012).

Os congeladores de leito fluidizado são congeladores a ar forçado modificado no qual o ar, a uma temperatura entre  $-25$  e  $-35^{\circ}\text{C}$ , passa em alta velocidade ( $2$  a  $6\text{ m s}^{-1}$ ) através de uma camada de alimento de 2 a 13 cm, contido em uma bandeja ou esteira transportadora perfurada. Esse método é restrito a alimentos particulados (FELLOWS, 2006).

b) *Congeladores a Líquido Refrigerante*: Nessa técnica ocorre imersão direta dentro do meio refrigerante ou a pulverização do líquido sobre o produto, havendo assim um congelamento quase que instantâneo (ultrarrápido). O líquido refrigerante deve ter certos requisitos, como ser não tóxico, puro, ausência de odores e sabores, limpo, entre outros (WOJSLAW, 2012). Ao contrário do que ocorre no congelamento criogênico, o líquido permanece fluido ao longo do congelamento e não ocorre mudança de estado (FELLOWS, 2006)

c) *Congeladores de Superfície Resfriada*: Os congeladores de placas consistem em uma pilha horizontal ou vertical de placas ocas, através das quais é bombeado um

fluido refrigerante a  $-40^{\circ}\text{C}$ . Eles podem ser sistemas contínuos, semicontínuos ou em batelada. Alimentos planos e relativamente finos são colocados em camadas simples entre as placas e uma leve pressão é aplicada pela compressão das placas. Isso aumenta o contato entre a superfície do alimento e as placas, portanto aumenta a taxa de transferência de calor. As vantagens desse tipo de equipamento incluem economia e boa utilização do espaço, custos de produção relativamente baixos em comparação com outros métodos, pequena desidratação do produto e, portanto, descongelamento mínimo dos condensadores, além de altas taxas de transferência de calor. As principais desvantagens são o custo inicial relativamente alto e as restrições quanto à forma dos alimentos, que devem ser achatados e finos (FELLOWS, 2006).

#### **2.3.4.2 Congeladores Criogênicos**

Congeladores desse tipo são caracterizados por uma mudança de estado no fluido refrigerante (ou criogênico) pela absorção do calor pelo alimento em congelamento. O calor proveniente do alimento proporciona, portanto, o calor latente de vaporização ou sublimação do fluido criogênico. Esta fica em contato íntimo com o alimento e remove rapidamente o calor de toda a superfície do alimento, provocando altos coeficientes de transferência de calor e um congelamento rápido. Os dois refrigerantes mais comuns são o nitrogênio líquido e o dióxido de carbono sólido ou líquido (FELLOWS, 2006). Duas vantagens dos congeladores criogênicos, comparados aos sistemas mecânicos, são o baixo custo de capital e a flexibilidade para processar diversos tipos de produtos sem grandes mudanças no sistema (MILLER, 1998). Sua maior desvantagem é o custo relativamente alto do refrigerante.

#### **2.4 Parâmetros Termofísicos**

As propriedades térmicas dos produtos hortícolas resumem-se à sua habilidade de transferir calor, sendo essenciais na análise da transferência de calor que ocorre em processos térmicos tais como refrigeração, congelamento e aquecimento, bem como otimização do desempenho de equipamentos de transferência de calor; sendo o conhecimento destas propriedades essencial para o desenvolvimento da ciência de alimentos e agrícola (CASTRO, 2004; NUNES *et al.*, 2002).

O conhecimento das propriedades termofísicas e seu comportamento durante o processo de abaixamento de temperatura são essenciais para a compreensão do fenômeno. As propriedades termofísicas de materiais biológicos dependem das características de cada produto, como, umidade, estrutura, composição centesimal, que podem variar dependendo do processo realizado (MATTOS, 2007). A temperatura é outro fator que pode causar uma variação de diversas propriedades, como calor específico e condutividade térmica, e identificar sua influência nessas propriedades é de grande importância para uma correta formulação do fenômeno físico do congelamento.

#### **2.4.1 Densidade**

A densidade de uma substância é definida pela razão entre sua massa e seu volume. Na maioria dos problemas de Engenharia, sólidos e líquidos são considerados incompressíveis, ou seja, a densidade é pouco afetada por mudanças moderadas de temperatura e pressão. Diferenças de densidades de fluidos aquecidos são responsáveis pela convecção natural. Na maioria dos casos, a densidade decresce com o aumento da temperatura (MATTOS, 2007).

#### **2.4.2 Condutividade Térmica**

A condutividade térmica é uma propriedade do material que descreve a taxa com que o fluxo de calor escoa sob a influência de um gradiente de temperatura e pode ser predita pela Lei de Fourier da condução de calor (ARAGÃO, 2007)

Segundo Mohsenin (1980) os valores de condutividade variam com a composição química, estrutura física, temperatura e estado da matéria. No caso de materiais biológicos, a temperatura é menos influente na condutividade térmica que a estrutura celular, a densidade e a umidade.

#### **2.4.3 Calor Específico**

O calor específico corresponde à energia necessária para alterar a temperatura da massa unitária do produto em um grau, baseada estritamente na quantidade de

energia requerida e não na taxa em que ocorre essa mudança de temperatura (FONTANA *et al.*, 1999). Segundo Ashrae (1993), o calor específico é diretamente proporcional ao conteúdo de água em frutos e hortaliças.

#### **2.4.4 Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor**

O coeficiente superficial de transferência de calor ( $h$ ) não é uma propriedade térmica dos alimentos, mas é necessário para projetar equipamentos para alimentos onde se envolve a transferência de calor por convecção, bem como para validar os resultados gerados, via simulação numérica do processo de resfriamento rápido com ar forçado (ASHRAE, 1993; PIROZZI e AMENDOLA, 2005).

O coeficiente convectivo de transferência de calor é a taxa de transferência de calor para cada grau de diferença de temperatura através da interface sólido-fluido por unidade de área da superfície do material sólido (CASTRO, 2004).

Ashrae (1993) afirma que o resfriamento com ar forçado de produtos hortícolas depende da velocidade de ar e das condições termodinâmicas do ar circundante, os quais influenciam diretamente o coeficiente convectivo de transferência de calor. O tipo de embalagem, dimensões, área de abertura e o tipo de arranjo das mesmas no resfriamento também influenciam nos valores deste parâmetro (DÚSSAN-SARRIA, 2003; THOMPSON *et al.*, 1998). Além das características dos frutos, tais como temperatura e forma geométrica (THOMPSON *et al.*, 1998).

### **2.5 Modelagem Matemática**

Três ferramentas estão disponíveis para resolução de um determinado problema físico, são elas: os métodos analíticos, métodos numéricos (experimentação numérica) e experimentação em laboratório.

Segundo Maliska (2004), os métodos analíticos e numéricos formam a classe dos métodos teóricos, pois ambos objetivam resolver equações diferenciais que formam o modelo matemático. 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 robustos. Uma vantagem significativa é a obtenção da solução em forma fechada, requerendo baixíssimos tempos de computação.

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 das condições reais, questões envolvendo segurança, dentre outros. Porém, na ausência de modelos matemáticos estabelecidos e em geometrias extremamente complexas, muitas vezes esta é a única alternativa disponível.

A experimentação numérica (métodos numéricos) praticamente não apresenta restrições, podendo resolver problemas complexos com condições de contorno gerais, definidos em geometrias arbitrárias e apresentando resultados com uma rapidez muito grande. A comparação dos resultados numéricos com os resultados analíticos, se existirem, ou com outros resultados numéricos, caracteriza a validação numérica, que atesta a qualidade do método numérico. Por outro lado, a comparação de resultados numéricos com os resultados experimentais, identifica a validação física, que se preocupa com a fidelidade do modelo matemático para com o problema físico.

### **2.5.1 Métodos analíticos e empíricos**

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 e 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 e 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 e 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.

### **2.5.2 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 (Equação 2.1 e 2.2) (CRESPO, 1996; AGNELLI e 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;  $\rho$  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 Equação 2.1 é a formulação em temperatura (método clássico) para transferência de calor. Nela a temperatura é a única variável dependente. A Equação 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 e 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 Equações 2.1 e 2.2, dentre eles, destacam-se: diferenças finitas, elementos finitos, elementos



de contorno e volumes finitos (PATANKAR, 1980; MALISKA, 2004; FORTUNA, 2000; VERSTEEG e 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 e MEDINA, 2000; AGNELLI e MASCHERONI, 2001; MORAGA e BARRAZA, 2002).

Neckel *et al.* (2010) desenvolveu um código computacional em FORTRAN 95 para a modelagem e simulação do congelamento por convecção forçada de um alimento, em específico a beterraba, no formato de um paralelepípedo sujeita a um campo variável de coeficientes de transferência de calor. O modelo matemático utilizado para a simulação numérica foi a equação diferencial de transferência de calor baseada no modelo entálpico tridimensional em regime transiente, as equações foram resolvidas usando o método das diferenças finitas, e os resultados foram comparados aos experimentos elaborados por Strapasson (2006). O código computacional desenvolvido permitiu prever com razoável precisão a evolução da temperatura no interior do alimento submetido ao processo de congelamento.

Mannapperuma e 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.

Na Tabela 2.5 encontram-se alguns métodos desenvolvidos, a técnica utilizada na resolução das equações de transferência de calor e massa (Equações 2.1 e 2.2) bem como as condições durante o processo de resfriamento e congelamento de alguns materiais biológicos.

Tabela 2.5: Modelos de predição do tempo de congelamento e resfriamento.

Referência	Técnica	Produto	Processo	Condições
Tocci e Mascheroni (1995)	Diferenças finitas (explícito)	Carne (produto esférico)	Resfriamento e armazenamento	Coeficientes de transferência de calor e massa corrigidos para incluir a desidratação na camada superficial
Agnelli e 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 e 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 e 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 e Mittal (1994)	Elementos finitos	Carcaça de carne	Resfriamento	Propriedades térmicas em função da temperatura
Hayakawa e Sucar (1982)	Elementos finitos	Frutas e hortaliças (produtos esféricos)	Resfriamento	Geração de calor dependente da respiração, temperatura e tempo
Chau e Gaffney (1990)	Diferenças finitas (explícito)	Frutas e hortaliças (produtos esféricos)	Resfriamento	Respiração e transpiração incluídas

Fonte: Adaptado de Silva (2005)

## 2.6 Fluidodinâmica Computacional

A Fluidodinâmica Computacional (ou CFD – *Computational Fluid Dynamics*) trata-se de uma poderosa ferramenta na análise de problemas em sistemas que envolvem desde fluidos em escoamentos: como a análise de turbulência e aerodinâmica em geometrias diversas; bem como transferência de calor: difusão, convecção e radiação em superfícies; além de outros fenômenos associados com reações químicas, como por exemplo, a combustão interna em motores do ciclo Diesel e Otto. As técnicas de CFD baseiam-se no entendimento do comportamento físico do escoamento de fluidos em um volume de controle através de simulação computacional, que discretiza as equações parciais que descrevem o escoamento (equações de conservação da energia, massa e quantidade de movimento) utilizando uma geometria virtual ou malha computacional (FORTUNA, 2000; TAVARES, 2012)

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), as etapas importantes do processo de simulação utilizando CFD são:

*Pré-processamento*: definição da geometria ou domínio de estudo que se pretende trabalhar; geração da malha dividindo o domínio em pequenos subdomínios responsáveis por receber os cálculos referente às soluções das equações de conservação pelos métodos numéricos; e, a definição das propriedades do domínio de estudo (densidade, viscosidade, vazão volumétrica de cada fase, etc.), bem como as condições iniciais e de contorno do escoamento;

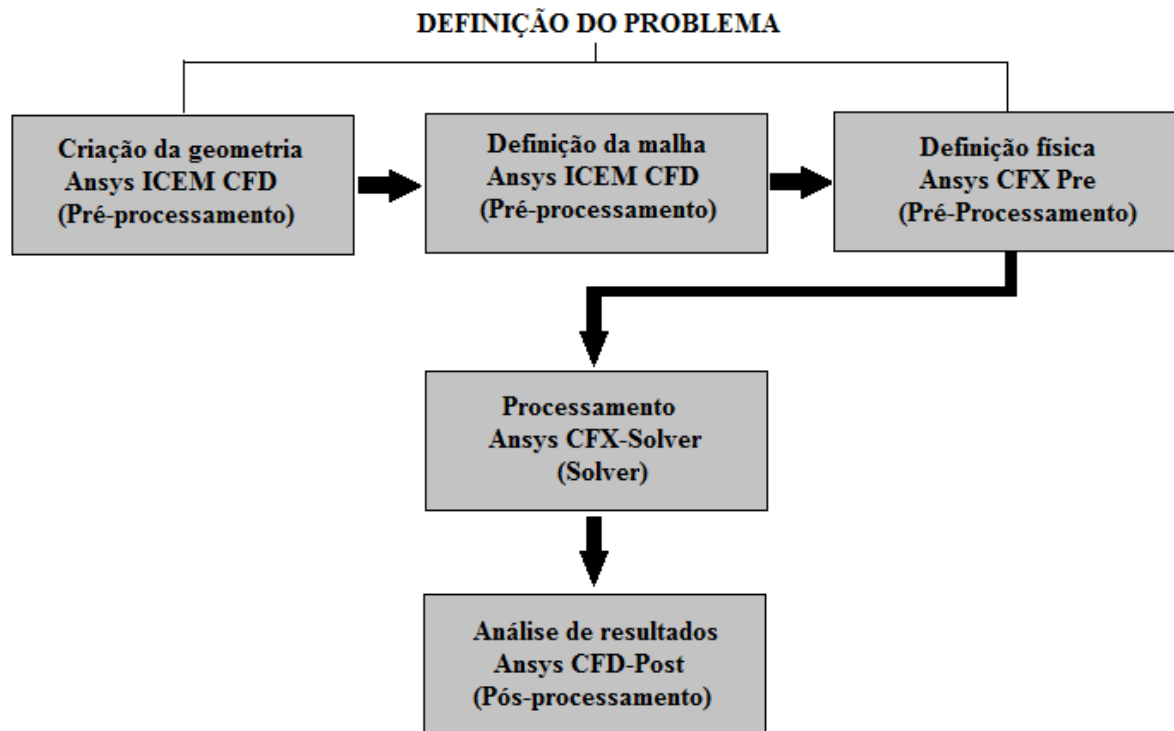
*Solver*: nesta etapa as técnicas numéricas de solução são implementadas para resolver os problemas físicos do caso em estudo. Ocorre a transformação do sistema de equações diferenciais parciais em um sistema de equações algébricas que será resolvido por métodos numéricos, podendo ser diretos (Eliminação de Gauss e Decomposição LU) ou iterativos (Método de Gauss Seidel, Método de Jacobi e Método das Sobre-Relaxações Sucessivas).

*Pós-processamento*: aqui os dados encontrados através da etapa anterior são organizados e trabalhados através de gráficos, imagens, etc., para uma melhor interpretação dos resultados.

### **2.6.1 Software ANSYS CFX**

O pacote computacional ANSYS CFX<sup>®</sup> é um aplicativo bastante utilizado em análises de problemas diversos pertencente ao ramo da fluidodinâmica. Possui vários recursos de trabalho: o módulo ICFM CFD onde pode-se criar a geometria do problema que se deseja trabalhar e a definição de sua malha, que será o domínio de estudo, o módulo CFX, subdivido em dois submódulos (CFX-Pre e CFX-Solver) responsáveis pelas etapas de entradas de dados e processamento, e por último o módulo CFD Post onde se faz a interpretação e análise dos resultados. A Figura 15 mostra as etapas diretas para uma simulação computacional com o ANSYS CFX<sup>®</sup>. A sua linguagem de programação baseia-se em FORTRAN e trabalha diretamente com a resolução de equações de conservação sobre a região de interesse (TAVARES, 2012). O método empregado pelo *software* ANSYS CFX<sup>®</sup> para a resolução dos problemas físico em estudo é o método dos volumes finitos baseado em elementos finitos. A Figura 2.15 mostra um fluxograma das etapas da resolução de um problema simulado no ANSYS CFX<sup>®</sup>.

Figura 2.15: Etapas diretas da simulação computacional utilizando o ANSYS CFX®. Fonte: SILVA (2016)



## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

Este trabalho foi desenvolvido a partir de um comparativo de uma análise experimental e simulação computacional. A metodologia de cada uma das etapas será detalhada ao longo deste capítulo.

#### **3.1 Metodologia experimental da cinética de congelamento do pedúnculo do caju**

Este trabalho foi realizado no Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), no mês de Abril de 2016. Para tal, foram adquiridos cajus no mercado central de Campina Grande – PB. Os frutos selecionados possuíam as seguintes características:

- ✓ Boa aparência e apresentavam-se frescos;
- ✓ Não possuíam manchas ou danos mecânicos;
- ✓ Apresentavam uniformidade em sua geometria;

- ✓ Maturação adequada;
- ✓ A castanha de caju estava bem formada, íntegra, sem sinais de danos e firmemente aderida ao pedúnculo.

Sete amostras foram selecionadas, onde, posteriormente, foi realizado o descastanhamento com o fio de nylon, evitando assim o rompimento do pedúnculo do caju, em seguida, foram enumeradas e pesadas em uma balança de precisão, da fabricante MARTE, modelo AL500C.

As dimensões das amostras foram medidas utilizando um paquímetro analógico universal de 300 mm, da fabricante MITUTOYO. As medidas foram realizadas nos três eixos mutuamente perpendiculares, sendo estes denominados de Diâmetro 1 ( $D_1$ ), Diâmetro 2 ( $D_2$ ) e Altura (H); essas medições foram realizadas a fim de se determinar o ponto central de cada uma das amostras, sendo este ponto, o local onde o termopar ficou situado durante todo o experimento. Como intuito de manter uma padronização durante a experimentação, foi estabelecido que a dimensão denominada  $D_2$  estaria na mesma direção onde foi realizado o furo para introdução do termopar nas amostras. A Tabela 3.1 mostra de forma sumarizada as dimensões e massas medidas em cada amostra.

Tabela 3.1: Medições das amostras do pedúnculo do Caju

	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Altura (mm)	Massa (g)
AMOSTRA 1	51,6	53,3	75,8	104,60
AMOSTRA 2	51,6	49,4	65,5	87,14
AMOSTRA 3	52,0	49,5	75,1	96,48
AMOSTRA 4	56,0	55,3	72,8	105,18
AMOSTRA 5	55,2	52,4	70,4	99,82
AMOSTRA 6	53,8	50,5	65,6	88,07
AMOSTRA 7	49,0	49,6	65,5	81,72

Após as medições, um pequeno furo foi feito nas amostras, com um fio metálico de 1 mm de diâmetro, no qual a profundidade do furo foi igual a metade da dimensão  $D_2$ , visto que a direção do furo e da dimensão  $D_2$  eram coincidentes, encontrando assim o ponto central das amostras. Três micro-termopares tipo K com 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro foram utilizados para a medição da temperatura durante o experimento. A temperatura foi monitorada com um sistema de aquisição de dados da marca Agilent, modelo 34970A, no qual foi configurado para registrar a temperatura dos termopares a cada 10 segundos, e ainda utilizou-se um *desktop*. E para realizar o congelamento, um refrigerador convencional Consul 240 litros foi utilizado. No congelador, foi feita uma amarração com fios metálicos, que serviram de suporte para acomodar as amostras que foram envolvidas em uma rede de *nylon*, e o conjunto preso ao suporte por um gancho, essa configuração teve como objetivo evitar que as amostras ficassem em contato com as paredes do congelador, já que o experimento visou realizar o congelamento do pedúnculo do caju sobre a influência de um fluxo convectivo, sem utilizar outros meios de transferência de calor. A configuração descrita acima pode ser visualizada na Figura 3.1.

Figura 3.1: Configuração do experimento. Fonte: Autoria Própria.





O experimento foi realizado utilizando duas amostras de cada vez. O furo onde o termopar foi inserido foi vedado com silicone. Foram utilizados três termopares, no qual, dois deles foram inseridos no ponto central das amostras, e o terceiro foi deixado na parte inferior do congelador, sendo este responsável por monitorar a temperatura dentro do congelador, porém, sua função no experimento não foi de determinar a temperatura do meio onde as amostras se encontravam, e sim de verificar se alguma anormalidade ocorrera no congelador, como por exemplo, uma abertura de porta ou o degelo periódico do refrigerador.

O experimento foi considerado finalizado quando a temperatura das amostras estava estabilizada em torno de  $-14,5^{\circ}\text{C}$ . Os dados gerados foram então importados para o *software* Origin<sup>®</sup>, onde foram tratados, e gráficos da temperatura em função do tempo para cada amostra foram gerados.

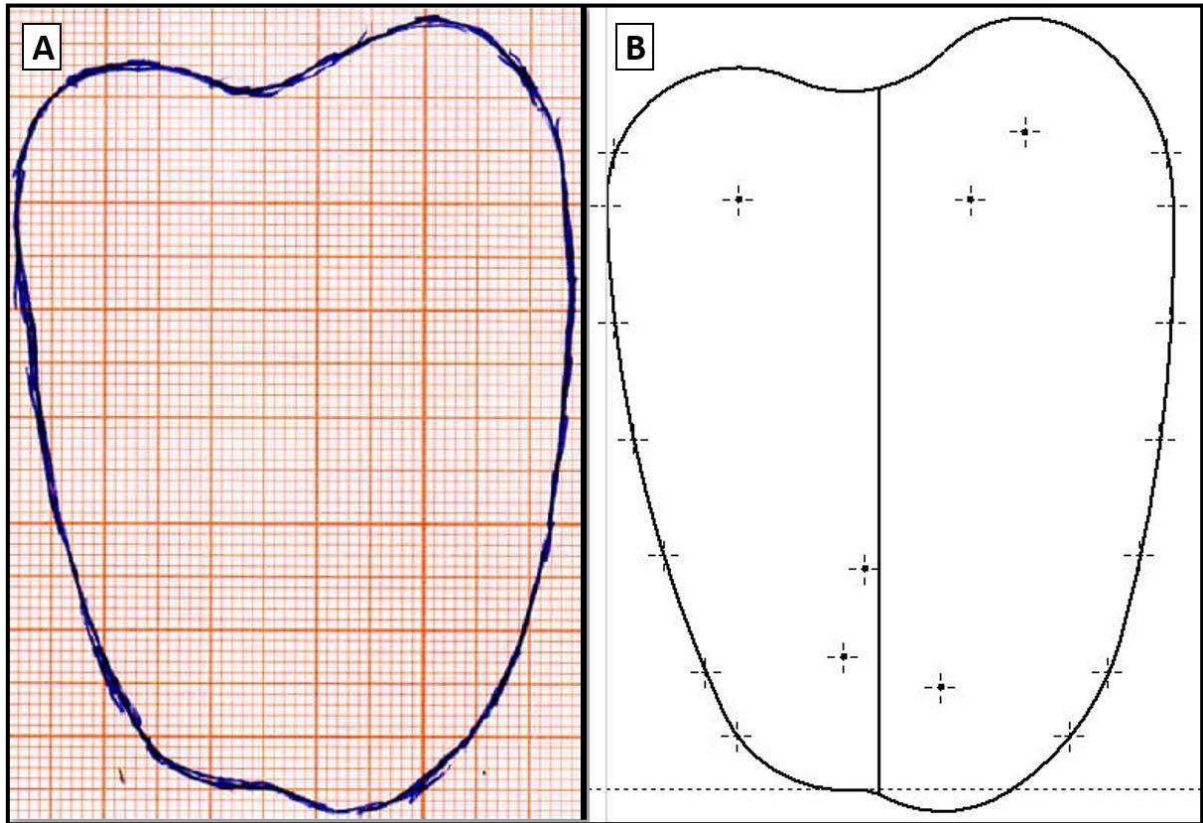
Após a construção do gráfico, sua derivada foi calculada e a metodologia proposta por Rahman *et al.* (2002) para determinar a temperatura inicial e final do congelamento foi adotada. Assim, as temperaturas iniciais e finais de congelamento das amostras e os tempos de resfriamento, congelamento e pós-congelamento puderam ser definidos.

## **3.2 Metodologia da análise computacional**

### **3.2.1 Construção da geometria**

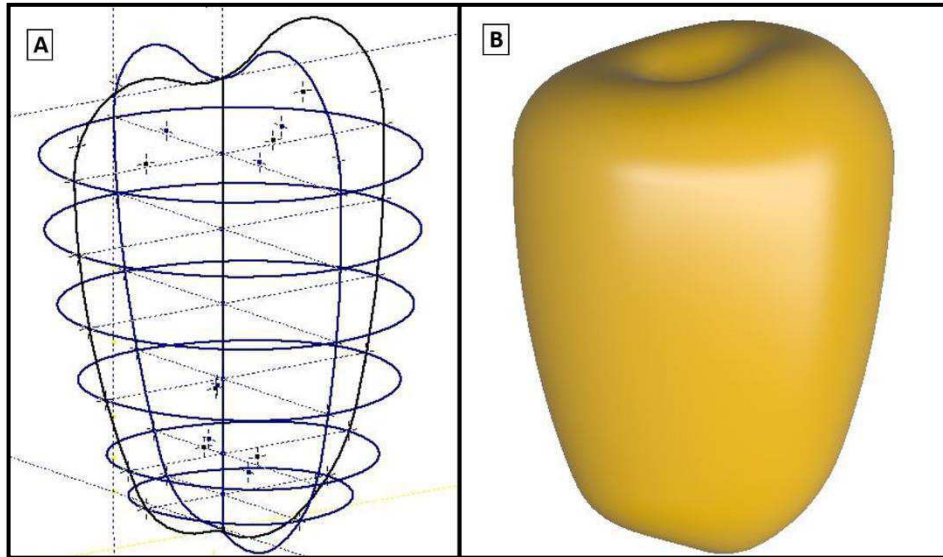
Ao final da análise experimental, as amostras foram segmentadas em duas partes e os seus contornos de uma das secções foram obtidos numa folha de papel milimetrado, feito isso, uma das amostras foi selecionada para que sua geometria fosse reproduzida no ambiente computacional, sendo a amostra três a escolhida, por apresentar contornos bem definidos e uniformes. Então, após a medição das dimensões da geometria estudada, sua reprodução no ambiente computacional foi realizada através do *software* Autodesk Inventor<sup>®</sup>. A Figura 3.2 apresenta o comparativo dos perfis feitos no papel milimetrado da amostra 3 e o reproduzido no ambiente computacional

Figura 3.2: Comparativo dos perfis: A) a partir da amostra 3, B) reproduzido no ambiente computacional. Fonte: Autoria Própria.



Ao finalizar a reprodução da geometria no Autodesk Inventor®, a etapa posterior consistiu em transformar a geometria 2D em uma geometria 3D, para tal, a geometria 2D foi replicada num plano perpendicular, no qual o eixo criado para dividir a geometria foi o local de intersecção dos planos, em seguida, ao longo da altura, foram feitas semi elipses para criar uma ligação das geometrias que estavam nos diferentes planos, essas elipses serviram como trilhas para a construção da geometria 3D, no qual, utilizado a função “LOFT” do Inventor nos perfis criados e nas trilhas, o sólido foi gerado. A construção da geometria 3D foi feita desta forma a fim de que a geometria que seria submetida a simulação, pudesse ser bem próxima da geometria da amostra real que foi ensaiada experimentalmente. A Figura 3.3 mostra a estrutura para a criação da geometria 3D e o sólido pronto após executar a comando “LOFT”.

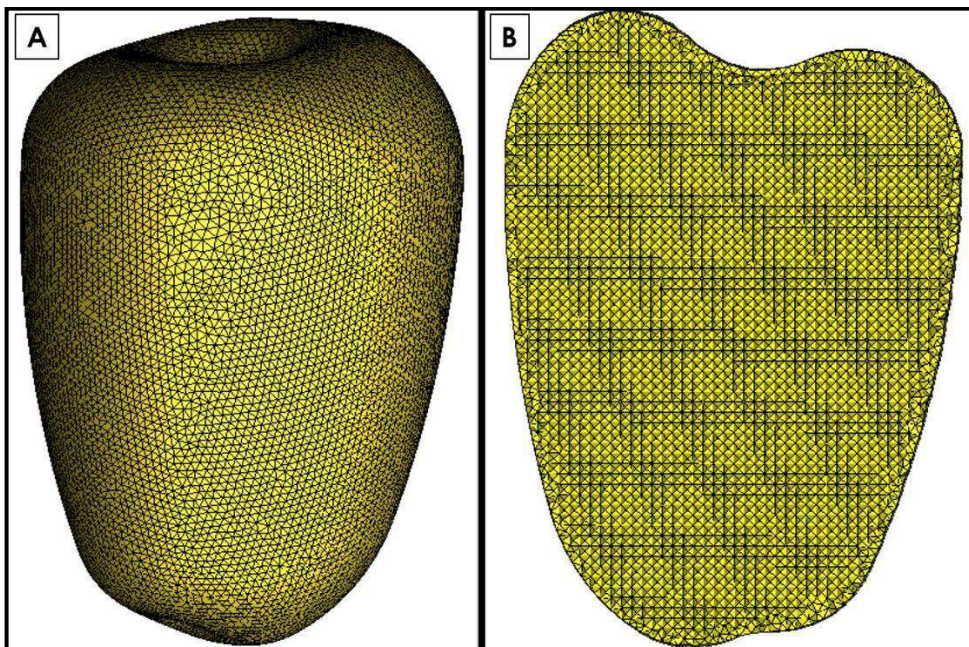
Figura 3.3: A) Estrutura para a criação da geometria 3D; B) Sólido 3D. Fonte: Autoria Própria.



### 3.2.2 Geração da malha

A malha computacional foi gerada no ANSYS ICEM CFD, no qual, optou-se em construir uma malha não estruturada, com elementos tetraédricos, utilizando o método Octree de geração de malha, assim, um total de 846829 elementos foram criados para esta geometria. A Figura 3.4 mostra a malha computacional gerada e uma vista da seção transversal da malha na região central da geometria.

Figura 3.4: A) Malha computacional do pedúnculo do caju B) Vista da seção transversal da malha na região central da geometria. Fonte: Autoria Própria.



Finalizado a etapa de criação da geometria e malha numérica, foi gerado um arquivo a ser utilizado no ANSYS CFX-Pre, onde foram incluídas as condições iniciais e de contorno do problema, bem como as propriedades termofísicas do objeto de estudo e o modelo matemático que trata da transferência de calor. As simulações foram realizadas no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, LCTF, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica do CCT/UFCG.

### 3.3 Modelagem matemática

A maioria dos métodos de conservação de alimentos envolve transferência de energia em forma de calor, e o processo de congelamento é um deles. A quantificação da energia necessária para o processo é desejável, a fim de reduzir os custos da operação e obter produtos com melhor qualidade. A descrição matemática e a solução da equação de difusão transiente é uma importante ferramenta para estudar melhor o fenômeno.

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 de forma não regular, considerando propriedades termofísicas variáveis durante a mudança de fase e condições de contorno convectivas na superfície do sólido.

A equação diferencial que descreve a transferência de calor para um meio sólido (Equação 3.1) pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + q''' \quad (3.1)$$

onde  $\rho$  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 (Limeira, 2003). O termo da mudança de fase do produto (Equação 3.2) pode ser obtido como segue:

$$q''' = \rho L_s \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3.2)$$

onde  $L_s$  é o calor latente de solidificação,  $f_s = (T_{cr} - T)/(T_{cr} - T_f)$  representa a fração de sólido (gelo) formada durante a fase de congelamento,  $T_{cr}$  é a temperatura de início de congelamento,  $T_f$  é a temperatura final do congelamento,  $T$  é a temperatura do sólido e  $t$  é o tempo.

Substituindo a Equação 3.2 na Equação 3.1, obtém-se a Equação 3.3:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho L_s \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3.3)$$

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

$$L_s = 0 \quad \text{para } T > T_{cr} \quad (\text{período de resfriamento})$$

$$L_s > 0 \quad \text{para } T_{cr} > T > T_f \quad (\text{período de congelamento})$$

$$L_s = 0 \quad \text{para } T < T_f \quad (\text{período de pós-congelamento})$$

Segundo LeBlanc *et al.*(1990b), o calor latente de solidificação pode ser obtido pela multiplicação do calor latente da água pura pela umidade a base úmida do produto.

No período do congelamento, o calor latente de solidificação estará ativo na equação diferencial de transferência de calor, e será nulo nas outras etapas do

congelamento. Substituindo a expressão de  $f_s$  na Equação 3.3 e agrupando os termos semelhantes, obtém-se a Equação 3.4, que representa a equação que governa o fenômeno físico:

$$\rho \left( c_p + \frac{L_s}{T_{cr} - T_f} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.4)$$

### 3.4 Condições iniciais e de contorno

A condição inicial aplicada a simulação foi a seguinte: temperatura uniforme em toda a geometria e igual a temperatura inicial da amostra ensaiada experimentalmente, sendo esta identificada como a primeira temperatura registrada no experimento que foi de 27,287°C.

A condição de contorno aplicada na simulação foi a seguinte: Geometria sujeita a um fluxo convectivo constante durante toda a simulação

O valor do coeficiente de transferência de calor convectivo que o sólido estaria exposto na simulação foi calculado primeiramente pela correlação empírica desenvolvida por Churchill (Equações 3.5 e 3.6), no qual é possível estabelecer o coeficiente convectivo de uma esfera submetido à convecção natural, válida para esferas em fluidos com  $Pr \geq 0,7$  e  $Ra_D \leq 10^{11}$ . Em vista disso, a geometria do pedúnculo do caju foi aproximada de uma geometria esférica, para que a correlação de Churchill pudesse ser utilizada. Para tal, o volume da esfera deveria ser igual ao volume da geometria do pedúnculo, sendo este fornecido pelo ANSYS CFX®, que é igual a 117,544 cm<sup>3</sup>.

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}_D D}{k} = 2 + \frac{0,589x(Ra_D)^{\frac{1}{4}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,469}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{4}{9}}} \quad (3.5)$$

$$Ra_D = \frac{gx\beta x(T_s - T_\infty)D^3}{v \cdot \alpha} \quad (3.6)$$

Nas Equações 3.5 e 3.6,  $\overline{Nu}_D$  é o número de Nusselt,  $\overline{h}_D$  é o coeficiente convectivo ( $W/m^2.K$ ),  $D$  é o diâmetro da esfera (m),  $k$  é a condutividade térmica do ar ( $W/m.K$ ),  $Ra_D$  é o número de Rayleigh para o ar,  $Pr$  é o número de Prandtl para o ar,  $g$  é a gravidade ( $m/s^2$ ),  $\beta$  é o coeficiente de expansão ( $1/K$ ),  $T_s$  é a temperatura superficial (K),  $T_\infty$  é a temperatura do meio (K),  $\nu$  é a viscosidade cinemática do ar ( $m^2/s$ ) e  $\alpha$  é a difusividade do ar ( $m^2/s$ )

O coeficiente de transferência de calor por convecção determinado pela correlação de Churchill foi de  $6,94 W/m^2.K$ , sendo este utilizado como ponto de partida para encontrar o coeficiente de transferência de calor convectivo que melhor se ajustasse aos dados experimentais.

### 3.5 Convecção forçada

Depois de realizado a validação física do problema, foi feito um estudo para identificar a influência do teor de umidade do produto, visto que, existe uma formulação matemática para diversas propriedades termofísicas em função do teor de umidade, como também do coeficiente de convecção, sendo este fortemente influenciado pelo método de congelamento empregado no processo.

No que diz respeito ao teor de umidade em base úmida ( $X'$ ), este foi variado para os valores de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%. Ao alterar o teor de umidade, há uma alteração nas propriedades durante a simulação: densidade, calor específico, condutividade térmica e o calor latente de solidificação.

Já para o coeficiente de transferência de calor por convecção, considerou-se que o processo de congelamento ocorrera via convecção forçada e que o ar estaria com as seguintes velocidades: 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s. Para determinar o coeficiente de convecção resultante para cada velocidade, utilizou-se a correlação de Whitaker (Equações 3.7 e 3.8), no qual é possível estabelecer o coeficiente convectivo em uma esfera submetida a um escoamento externo, válida para escoamento no qual  $0,71 \leq Pr \leq 380$  e  $3,5 \leq Re_D \leq 7,6 \times 10^4$ . A temperatura do ar foi alterada para  $-20^\circ C$ , visto que essa temperatura é usualmente utilizada nos processos de congelamentos.

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}_D \cdot D}{k} = 2 + (0,4Re_D^{1/2} + 0,06Re_D^{2/3}) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{1/4} \quad (3.7)$$

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (3.8)$$

Nas Equações 3.7 e 3.8,  $\overline{Nu}_D$  é o número de Nusselt,  $\bar{h}_D$  é o coeficiente convectivo (W/m<sup>2</sup>.K), D é o diâmetro da esfera (m), k é a condutividade térmica do ar (W/m.K),  $Re_D$  é o número de Reynolds para o ar, Pr é o número de Prandtl para o ar,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do ar (kg/s.m),  $\mu_s$  é a viscosidade dinâmica do ar na temperatura da superfície (kg/s.m),  $\rho$  é a densidade (kg/ m<sup>3</sup>) e V é a velocidade do ar (m/s). Tem-se ainda que, todas as propriedades, exceto  $\mu_s$ , são avaliadas a  $T_\infty$ .

### 3.6 Propriedades termofísicas

Para este trabalho, foram realizadas algumas simplificações em relação às propriedades termofísicas. A Tabela 3.2 mostra de forma qualitativa, as regras que as propriedades de interesse do problema foram abordadas em cada etapa do congelamento:

Tabela 3.2: Regras que as propriedades termofísicas foram submetidas

PROPRIEDADE	FÓRMULA	APLICABILIDADE
Densidade	$\rho$	Constante durante o processo
	$k_r$	Durante o resfriamento ( $T > T_{cr}$ )
Condutividade Térmica	$k_c = k_r + (k_{pc} - k_r) \frac{(T - T_{cr})}{(T_f - T_{cr})}$	Durante o congelamento ( $T_{cr} > T > T_f$ )
	$k_{pc}$	Durante o pós-congelamento ( $T < T_f$ )



	$C_{pr}$	Durante o resfriamento ( $T > T_{cr}$ )
Calor Específico	$C_{pc} = \frac{C_{pr} + C_{ppc}}{2} + \frac{L_s}{T_{cr} - T_f}$	Durante o congelamento ( $T_{cr} > T > T_f$ )
	$C_{ppc}$	Durante o pós- congelamento ( $T < T_f$ )

Aragão (2007) desenvolveu modelos empíricos a partir de regressão não linear ajustado a dados experimentais para o calor específico, condutividade térmica, densidade, entre outras propriedades, como uma função do teor de umidade durante o processo de secagem de fatias de caju. Tais modelos foram utilizados para determinar os valores das propriedades termofísicas de interesse considerando a umidade inicial do pedúnculo do caju.

Mattos (2007) e Kurozawa *et al.* (2008) conseguiram determinar experimentalmente pelo método da fonte linear de calor, a condutividade térmica média do caju *in natura*, válida para uma determinada faixa de temperatura.

Não foram encontrados na literatura dados sobre as propriedades termofísicas do pedúnculo do caju quando este encontra-se congelado, assim, uma lista com dados das propriedades termofísicas de frutos que possuem um teor de umidade próximos ao do pedúnculo do caju, tais como: abacaxi, figo, laranja, limão e morango, foi elaborada com o objetivo de estimar o valor das propriedades termofísicas do produto congelado.

Por fim, uma tabela com todos os dados encontrados na literatura e devidamente referenciados, foi desenvolvida e as propriedades que apresentaram valores distintos para diferentes autores, foram submetidas a uma média aritmética, sendo esta, o valor utilizado na simulação.

No que diz respeito às propriedades termofísicas, estas foram configuradas no ANSYS CFX® através do comando *IF*, no qual, utilizou-se uma expressão lógica em função da temperatura para que o programa conseguisse perceber as variações do calor específico e da condutividade térmica ao longo da simulação. Para tal, foram criadas expressões que apresentavam os valores numéricos ou fórmula das propriedades termofísicas do caju para cada etapa do congelamento.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 Experimentais

Ao término do experimento, os dados gerados foram tratados no *software* Origin®, onde gráficos da Temperatura x Tempo para cada amostra foram desenvolvidos, sendo que, os dados da Amostra 6 foram descartados após ser observado uma interrupção abrupta da aquisição dos dados no meio do experimento. Com a finalidade de realizar uma padronização dos gráficos, todos estes foram apresentados com o tempo experimental total de 42500 segundos. Feito isso, foi realizado uma média com os dados obtidos para se obter uma curva média da cinética de congelamento do pedúnculo do caju, sendo esta denominada “MÉDIA”. Assim, para uma melhor visualização dos resultados, foram elaborados dois gráficos (Figuras 4.1 e 4.2), no qual, cada um deles, agrupa as curvas de três das amostras ensaiadas e a curva MÉDIA, já que, se todas as curvas fossem postas em um único gráfico, a observação dos resultados e a distinção das cinéticas de congelamento de cada amostra seriam confusas pela quantidade de informações.

Figura 4.1: Cinética de congelamento do pedúnculo do caju, amostras 1, 2, 3 e média. Fonte: Autoria Própria

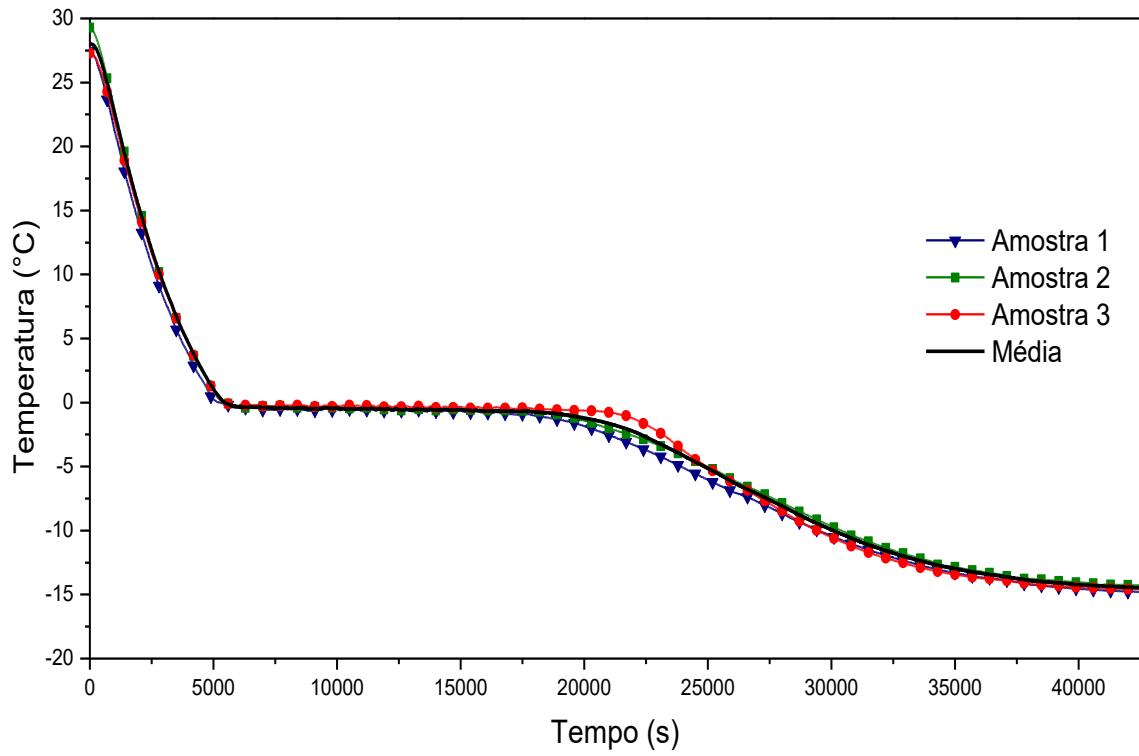
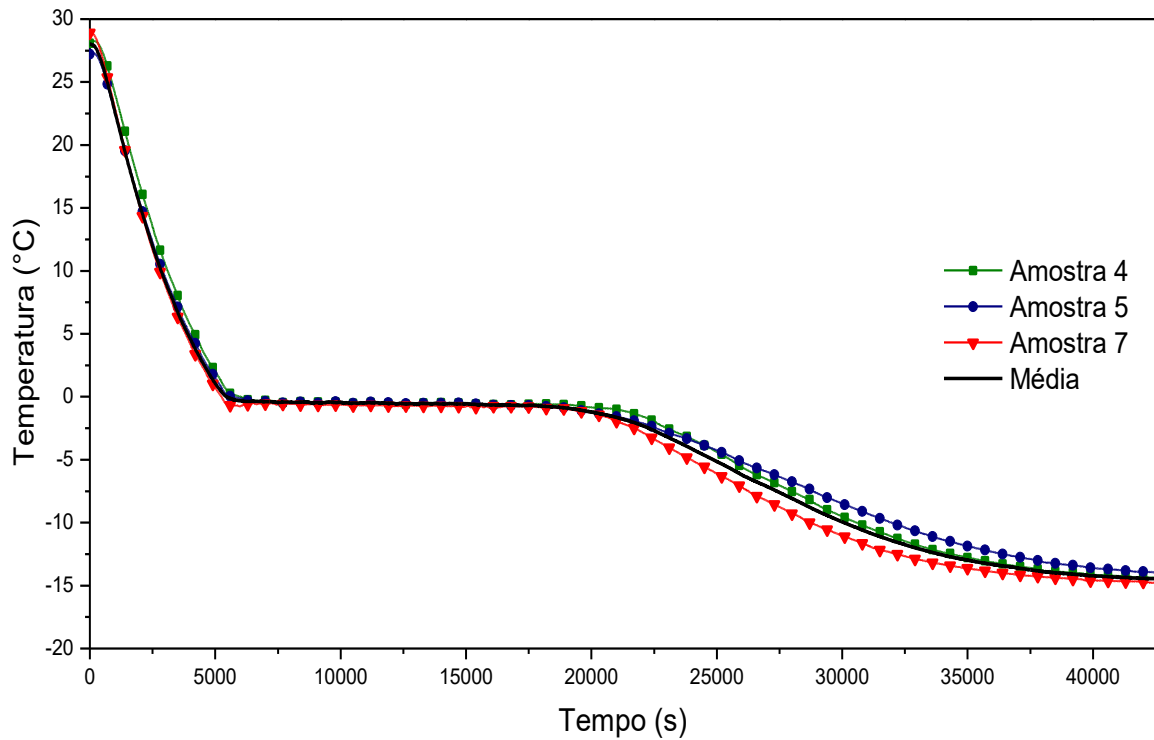


Figura 4.2: Cinética de congelamento do pedúnculo do caju, amostras 4, 5, 7 e média. Fonte: Autoria Própria



Através das Figuras 4.1 e 4.2, é possível observar que todas as amostras ensaiadas apresentaram um comportamento similar, afirmando assim, que a metodologia empregada conseguiu uma repetibilidade dos resultados. As curvas obtidas estão em conformidade com as curvas teóricas de congelamento lento para alimentos reportados na literatura. É possível observar claramente as três fases do processo de congelamento: resfriamento, congelamento e pós-congelamento. A curva denominada “MÉDIA” apresentou uma excelente concordância, e consegue descrever o comportamento médio de todas as amostras ensaiadas.

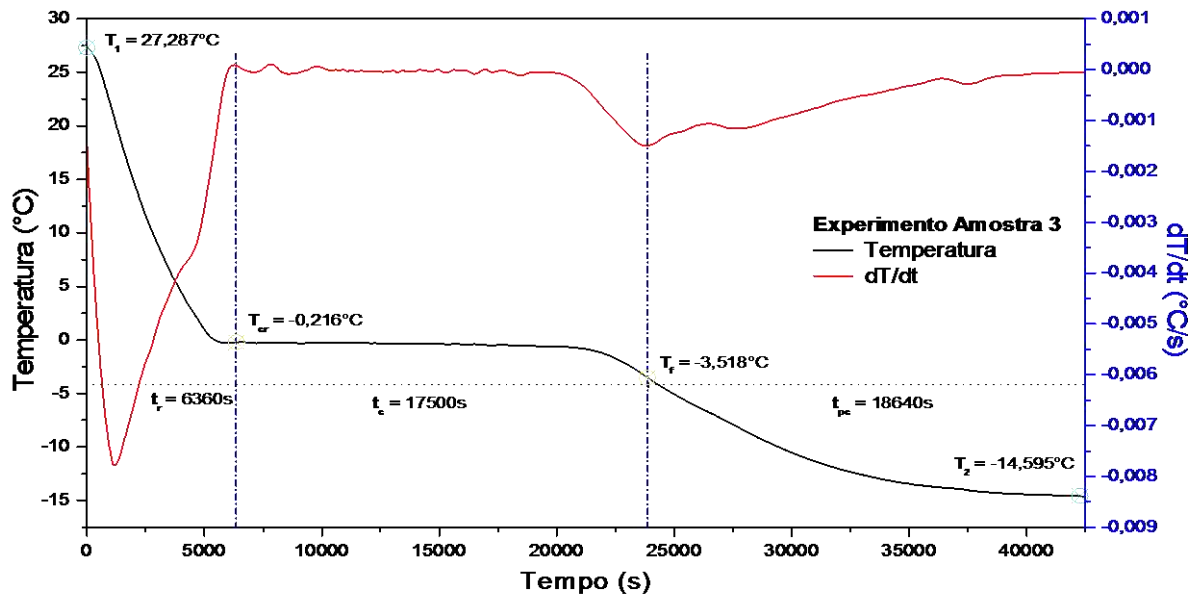
Para cada gráfico, foi possível determinar as temperaturas iniciais e finais das amostras, sendo estes identificados, respectivamente, como o primeiro e o último valor de temperatura scaneadas durante o experimento. Utilizando a metodologia proposta por Rahman *et al.* (2002), foi determinado também a temperatura inicial ( $T_{cr}$ ) e final ( $T_f$ ) de congelamento, para tal, um gráfico com a taxa de variação da temperatura com o tempo ( $dT/dt$ ) para cada amostra foi desenvolvido, e um ajuste desse gráfico foi realizado para uma melhor interpretação dos dados. As curvas de congelamento e suas derivadas foram então sobrepostas e os pontos de interesse identificados seguindo as seguintes regras:

a) Temperatura inicial de congelamento: ponto no gráfico onde sua derivada é aproximadamente zero;

b) Temperatura final de congelamento: Ponto do gráfico, após  $T_{cr}$ , onde há um pico na derivada, indicando assim que o congelamento foi completado.

Após determinar as temperaturas iniciais e finais de congelamento, foi estabelecido os tempos inerentes ao processo, sendo estes denotados como: tempo de resfriamento ( $t_r$ ), congelamento ( $t_c$ ) e pós-congelamento ( $t_{pc}$ ). A Figura 4.3 mostra a curva de congelamento, sobreposta a sua derivada, da amostra 3, sendo também possível identificar as temperaturas iniciais e finais da amostra, inicial e final de congelamento, e os tempos de resfriamento, congelamento e pós-congelamento.

Figura 4.3: Curva de congelamento do pedúnculo do caju e sua derivada mostrando as temperaturas e tempos inerentes do processo. Fonte: Autoria Própria



Os outros gráficos foram submetidos ao mesmo procedimento e podem ser consultados no Apêndice. Foi preferido utilizar a curva de congelamento da amostra 3 para demonstrar os resultados pelo fato desta ter sido utilizada para a validação física da modelagem numérica. Assim, a Tabela 4.1 mostra de forma sumarizada os resultados obtidos de todas as amostras.

Tabela 4.1: Temperaturas e tempos inerentes ao processo de congelamento das amostras de pedúnculo de caju

	$T_1$ (°C)	$T_{cr}$ (°C)	$T_f$ (°C)	$T_2$ (°C)	$t_r$ (s)	$t_c$ (s)	$t_{pc}$ (s)
Amostra 1	27,618	-0,422	-5,417	-14,799	6280	18060	181601
Amostra 2	29,402	-0,361	-5,366	-14,398	6470	18910	17120
Amostra 3	27,287	-0,216	-3,518	-14,595	6360	17500	18640
Amostra 4	28,071	-0,317	-5,041	-14,347	6640	18930	16930
Amostra 5	27,264	-0,362	-4,503	-13,932	6410	18890	17200
Amostra 7	29,061	-0,543	-3,525	-14,774	6890	15750	19860
MÉDIA	28,054	-0,365	-4,753	-14,454	6440	18170	17890
Valor médio	28,117	-0,370	-4,562	-14,474	6508,3	18006,7	17985
+ Desvio padrão	$\pm 0,918$	$\pm 0,109$	$\pm 0,869$	$\pm 0,324$	$\pm 222,8$	$\pm 1249,1$	$\pm 1136$

É possível verificar através dos resultados obtidos da Tabela 4.1, que o pedúnculo do caju apresenta uma temperatura inicial de congelamento média de  $-0,370^{\circ}\text{C} \pm 0,109$ . Não foram encontrados na literatura estudos sobre a  $T_{cr}$  do pseudofruto do caju, porém, o valor encontrado para esta temperatura está dentro do range esperado para alimentos com alto teor de umidade, conforme prevê Rahman *et al.* (2009) e Boonsupthip e Heldman (2007).

Foi possível também observar que, ao utilizar a metodologia proposta por Rahman *et al.* (2002), conseguiu-se determinar a  $T_f$  das amostras, sendo o valor médio da temperatura final de congelamento igual a  $-4,562^{\circ}\text{C} \pm 0,869$ . Não foi encontrado na literatura estudos sobre a  $T_f$  do pseudofruto do caju, contudo, LeBlank *et al.* (1990) realizou experimentos de congelamento com *french fries* em formato paralelepipedal, cuja umidade relativa média das amostras era de 73,72%, os autores encontram a temperatura final de congelamento média do alimento analisado sendo igual a  $-5,4^{\circ}\text{C}$ , sendo assim, espera-se que  $T_f$  de um produto alimentício que apresentem um elevado teor de umidade ( $> 70\%$ ) esteja em valores próximos ao encontrado no experimento de LeBlank *et al.* (1990). Portanto, o valor de  $T_f$  encontrado na cinética de congelamento do pedúnculo do caju apresenta um valor coerente ao esperado para esse tipo de alimento.

Vale salientar que, tanto  $T_{cr}$  quanto  $T_f$ , são característicos do produto, já as outras grandezas encontradas são característicos do processo, isto é, se as condições ambientais que o produto esteja sujeito forem modificadas, tais como: temperatura e/ou velocidade do meio refrigerante, meio refrigerante utilizado, temperatura inicial da amostra, entre outros, os parâmetros de tempo e temperatura inicial e final da amostra podem sofrer alterações, enquanto que  $T_{cr}$  e  $T_f$  não variam com modificações do processo.

Foi constatado que as amostras que possuíam as maiores temperaturas iniciais, tiveram o seu tempo de resfriamento levemente superior às outras amostras, contudo, o tempo médio de resfriamento foi de  $6508,3 \text{ s} \pm 222,8 \text{ s}$ . O tempo de congelamento e pós-congelamento foram semelhantes para todas as amostras, e seus valores médios são de  $18006,7 \text{ s} \pm 1249,1 \text{ s}$  e  $17985 \text{ s} \pm 1136 \text{ s}$ , respectivamente. É observado que, no período de resfriamento, as amostras tiveram suas temperaturas

variando em aproximadamente 28°C num tempo médio de 6500 s, já no período de pós-congelamento essa variação de temperatura foi de aproximadamente 10°C num tempo médio de 18000 s, assim, a taxa da variação da temperatura no tempo no período do resfriamento é quase oito vezes maior que no período do pós-congelamento, tal fato pode ser justificado devido à mudança das propriedades termofísicas provocadas pela mudança de fase da água contida no alimento, assim como um maior gradiente de temperatura entre a amostra e o meio refrigerante na fase de resfriamento que no pós-congelamento.

## 4.2 Teóricos

### 4.2.1 Propriedades termofísicas

Os valores das propriedades termofísicas foram encontradas através de equações e experimentos reportados na literatura.

#### 4.2.1.1 Densidade

A partir da Equação 4.1 desenvolvida por Aragão (2007) através de uma regressão não linear de dados experimentais, foi possível estimar a densidade do pedúnculo do caju em função do teor de umidade contida no alimento, assim:

$$\rho = 814,303 - 210,961 \exp\left(\frac{-X}{0,943}\right) \quad (4.1)$$

onde  $\rho$  é a densidade do pedúnculo do caju ( $\text{kg m}^{-3}$ ) e  $X$  é o teor de umidade em base seca ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

Conforme a Tabela 2.3 é possível observar que o pedúnculo do caju possui uma umidade em base úmida ( $X'$ ) de 88,1%, convertendo para umidade em base seca e substituindo na Equação 4.1 tem-se:

$$\rho = 814,303 - 210,961 \exp\left(\frac{-7,403}{0,943}\right) = \mathbf{814,22 \text{ kg m}^{-3}}$$



#### 4.2.1.2 Calor específico

Aragão (2007) desenvolveu a Equação 4.2, a partir de uma regressão não linear de dados experimentais, que descreve o calor específico volumétrico do pedúnculo do caju como função do teor de umidade em base seca, sendo esta análise válida para o material descongelado, assim:

$$C_{pv} = 0,6\ln(X) + 3,329\exp(-0,097X) \quad (4.2)$$

onde  $C_{pv}$  é o calor específico volumétrico do caju ( $J\ cm^{-3}\ ^\circ C^{-1}$ ) e  $X$  é o teor de umidade em base seca ( $kg\ kg^{-1}$ ), contudo, foi necessária a conversão do calor específico volumétrico para calor específico, através da razão entre  $C_{pv}$  e  $\rho$ , determinado anteriormente, assim:

$$C_p = \frac{C_{pv}}{\rho} = \frac{0,6\ln(7,403) + 3,329\exp(-0,097 \cdot (7,403))}{814,22} \cdot 10^6 = \mathbf{3469,19\ J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}}$$

Para determinar o valor do calor específico do pedúnculo do caju congelado, foi elaborada uma tabela (Tabela 4.2) com os valores do calor específico de outras frutas que possuem um teor de umidade semelhante ao do caju, visto que, o valor numérico das propriedades termofísicas de alimentos com elevado teor de umidade são similares, assim, pôde-se estimar o calor específico do pedúnculo congelado como sendo um valor intermediário aos encontrados para outras frutas com elevado teor de umidade. Tal estimativa é plausível, já que, as propriedades termofísicas de alimentos possuem forte influência de seus constituintes, tal influência pode ser observada no trabalho de Choi e Okos (1986), que desenvolveram um modelo matemático para prever as propriedades termofísicas dos constituintes dos alimentos (água, proteínas, carboidratos, gorduras, fibras e cinzas) em função da temperatura, que posteriormente, são utilizados para determinar as propriedades do alimento em questão.

Tabela 4.2: Calor específico de frutas variadas

Frutas	Teor de umidade (%) <sup>*</sup>	C <sub>p</sub> (kJ/kg K) (Pós-congelamento) <sup>**</sup>
Abacaxi	86,3 <sup>*</sup>	1,80 <sup>**</sup>
Laranja	86,9 <sup>*</sup>	1,80 <sup>**</sup>
Limão	87,4 <sup>*</sup>	1,84 <sup>**</sup>
Melancia	90,7 <sup>*</sup>	1,88 <sup>**</sup>
Morango	91,5 <sup>*</sup>	1,88 <sup>**</sup>
<b>Caju</b>	<b>88,1<sup>*</sup></b>	<b>1,85</b>

\* Taco (2016), \*\* Engineering Tool Box (2016)

Assim, é possível estimar que o calor específico do pedúnculo do caju congelado seja na ordem de 1,85 kJ/kg K

#### 4.2.1.3 Calor Latente

O valor do calor latente de solidificação ( $L_S$ ) foi obtido de acordo com LeBlanc *et al.* (1990b), no qual, multiplicou-se o calor latente da água pura ( $L_{sa}$ ), que é igual a 334900,0 J/kg, pela umidade a base úmida ( $X'$ ) do produto. Assim, o calor latente de solidificação do pedúnculo do caju é igual a:

$$L_S = L_{sa} \cdot X' = (334900) \cdot (0,881) = \mathbf{295046,9 \text{ J/kg}}$$

#### 4.2.1.4 Condutividade térmica

O valor da condutividade térmica do pedúnculo do caju foi obtido dos trabalhos de Aragão (2007), que desenvolveu a Equação 4.3, por regressão não linear, e de Mattos (2007) e Kurozawa *et al.* (2008), que utilizando o método da fonte linear de calor, obtiveram resultados semelhantes, tais resultados válidos para o material descongelado. A equação desenvolvida por Aragão (2007) é apresentada a seguir:

$$k = 0,372 \log(X) + 0,621 \exp(-0,128X) \quad (4.3)$$

onde  $k$  é a condutividade térmica ( $W m^{-1} °C^{-1}$ ) e  $X$  é o teor de umidade em base seca ( $kg kg^{-1}$ ). Resolvendo a Equação 4.3 para um teor de umidade em base seca de 7,403, tem-se:

$$k = 0,372 \log(7,403) + 0,621 \exp(-0,128 \cdot (7,403)) = \mathbf{0,564 W m^{-1} °C^{-1}}$$

Mattos (2007) obteve o valor médio de  $0,605 W m^{-1} °C^{-1}$ , para a condutividade térmica do pedúnculo do caju, já Kurozawa *et al.* (2008) obteve  $0,57 W m^{-1} °C^{-1}$ . Portanto, a condutividade térmica utilizada na simulação foi dada pela média dos valores encontrados, sendo igual a  $k = 0,5797 W m^{-1} °C^{-1}$

Com relação à condutividade térmica do pedúnculo do caju congelado, não foi encontrado na literatura qualquer referência, sendo assim, foi utilizado o valor da condutividade térmica do morango congelado encontrado experimentalmente por Delgado *et al.* (1997), visto que os dois frutos apresentam teor de umidade similares. Logo, o valor da condutividade térmica do pedúnculo do caju congelado foi estimado em  $k = 0,9347 W m^{-1} °C^{-1}$ . A Tabela 4.3 apresenta de forma compacta, os valores das propriedades termofísicas do pedúnculo do caju utilizados na simulação.

Tabela 4.3: Dados das propriedades termofísicas do pedúnculo do caju utilizados na simulação

Propriedade	Valores	Aplicabilidade	Fonte
Densidade ( $kg/m^3$ )	814,22	Constante durante o processo	Aragão (2007)
Condutividade Térmica ( $W/m K$ )	$\left. \begin{matrix} 0,564 \\ 0,605 \\ 0,57 \end{matrix} \right\} 0,5797$	Durante o resfriamento ( $T > T_{cr}$ )	Aragão (2007)
			Mattos (2007) Kurozawa <i>et al.</i> (2008)
	$\left. \begin{matrix} 0,556478 \\ -0,107511T \end{matrix} \right\}$	Durante o congelamento ( $T_{cr} > T > T_f$ )	-

	0,9347	Durante o pós-congelamento ( $T < T_f$ )	Delgado <i>et al.</i> (1996)
	3469,19	Durante o resfriamento ( $T > T_{cr}$ )	Aragão (2007)
Calor Específico (J /kg K)	92013,5926	Durante o congelamento ( $T_{cr} > T > T_f$ )	-
	1850	Durante o pós-congelamento ( $T < T_f$ )	-
Calor Latente (J/kg)	295046,9	Durante o congelamento ( $T_{cr} > T > T_f$ )	-

#### 4.2.2 Coeficiente de transferência de calor por convecção

Utilizando a correlação de Churchill (Equações 3.5 e 3.6), foi possível estimar o valor do coeficiente de convecção. Para tal, a geometria do pedúnculo do caju foi aproximada à de uma esfera, para que fosse viável a utilização da correlação de Churchill, sendo o volume da esfera igual ao volume do pedúnculo, que foi obtido através só *software* ANSYS CFX®. O volume encontrado foi de 117,544 cm<sup>3</sup>, que implica num diâmetro de aproximadamente 6,077 cm. As propriedades do ar, tais como: condutividade térmica ( $k$ ), viscosidade cinemática ( $\nu$ ), difusividade ( $\alpha$ ), coeficiente de expansão ( $\beta$ ) e número de Prandtl ( $Pr$ ), foram obtidas em Incropera *et al.* (2008) e avaliadas na temperatura do filme ( $T_m$ ), que é a temperatura média, dada em Kelvin, entre o meio refrigerante ( $T_\infty$ ) e a temperatura superficial ( $T_s$ ), sendo esta última igual a temperatura inicial da amostra. Todos os dados são listados na Tabela 4.4.

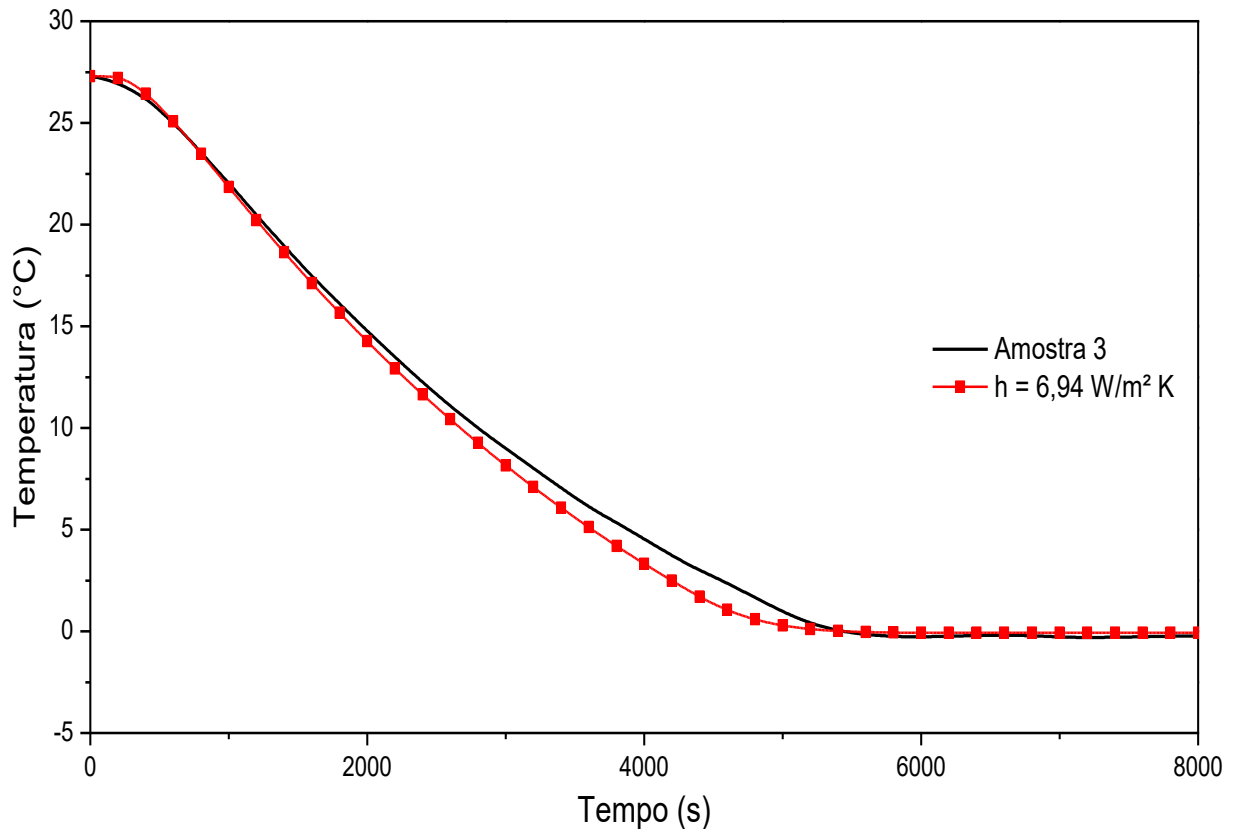
Tabela 4.4: Dados utilizados para obter o coeficiente de convecção pela correlação de Churchill.

<b>Dados</b>	<b>Valores</b>
$T_s$ (°C)	28
$T_\infty$ (°C)	-15
$T_m$ (K)	279,5
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,40655 \times 10^{-5}$
$k$ (W/m K)	$2,466 \times 10^{-2}$
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,9794 \times 10^{-5}$
$Pr$	0,7123
$\beta$ (1/K)	$3,57782 \times 10^{-3}$
$D$ (m)	$6,077 \times 10^{-2}$
$Ra_D$	$1,216563 \times 10^6$
$\overline{Nu}_D$	17,099549
$\overline{h}_D$ (W/m <sup>2</sup> K)	6,94

O valor encontrado para o coeficiente de transferência de calor por convecção pela correlação de Churchill serviu como referência para encontrar aquele que melhor se ajustava aos dados experimentais. Assim, uma simulação com este coeficiente de convecção de referência foi realizada e pode ser observado na Figura 4.4. Para desenvolver o gráfico, foi criado um ponto, denominado PONTO 1, localizado no centro do sólido, cuja localização é  $X_1 = -1,1015$  mm,  $Y_1 = 26,7186$  mm,  $Z_1 = 35,448$  mm, e deste ponto, foi extraído a temperatura em função do tempo. Tal procedimento foi empregado, a fim de que o ponto de investigação dos resultados da simulação fosse similar ao ponto de análise experimental, fazendo assim, que os resultados possam ser comparados.

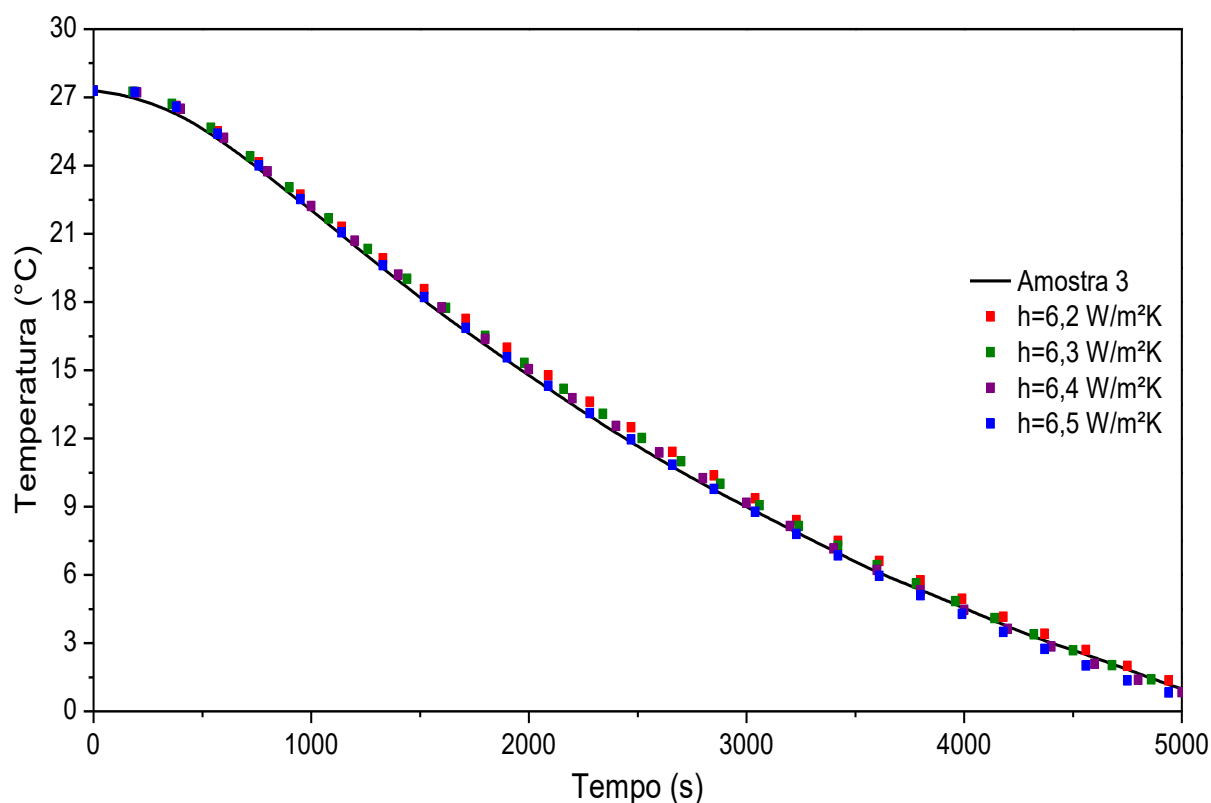
No que diz respeito as configurações utilizadas para realizar a simulação, foi empregado um passo de tempo de 5 segundos, o tempo total de simulação foi de 20000 segundos, o critério de convergência adotado foi um valor residual RMS de  $10^{-6}$ , e o modelo de transferência de calor foi o Thermal Energy Model. Essas configurações foram utilizadas em todas as simulações desse trabalho.

Figura 4.4: Comparativo entre a simulação para o coeficiente de convecção de  $6,94 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$  e dos dados experimentais. Fonte: Autoria Própria



Da Figura 4.4, é notável que a curva gerada com o coeficiente de convecção igual a  $6,94 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$  não apresenta uma boa concordância com os dados experimentais, visto que o resfriamento ocorreu mais rápido que o esperado, ficando evidente que o coeficiente de convecção utilizado foi superestimado, portanto, uma serie de outras simulações foram realizadas para encontrar o coeficiente de convecção que melhor se ajustava aos dados experimentais, para tal, foram utilizados coeficientes de convecção menores que o encontrado pela correlação de Churchill, sendo utilizados na simulação os seguintes valores para  $h$ :  $6,2 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$ ,  $6,3 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$ ,  $6,4 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$  e  $6,5 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$ . A Figura 4.5 mostra as curvas geradas para os diferentes coeficientes de convecção sobrepostas a curva dos dados experimentais.

Figura 4.5: Comparativo dos dados experimentais com a simulação com diferentes coeficientes de convecção. Fonte: Autoria Própria



É possível observar que o coeficiente de convecção que melhor se ajusta aos dados esta entre os valores de  $6,4 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$  e  $6,5 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$ . Então, outras simulações foram realizadas com valores dentro deste intervalo citado, no qual, a simulação cuja coeficiente de convecção de  $6,42 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$  apresentou a melhor concordância aos dados experimentais. A Figura 4.6 mostra os gráficos da simulação para o coeficiente de convecção de  $6,42 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$ , sobreposto aos dados experimentais, é possível observar ainda que uma região da curva foi destacada e pode ser visualizada na parte superior direita do gráfico, tal destaque foi realizado para evidenciar o ajuste da curva numérica e experimental.

O coeficiente de convecção de  $6,42 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$  apresentou-se bem próximo ao valor determinado pela correlação de Churchill, tal diferença é aceitável, visto que, o erro percentual entre os dois valores foi de apenas 7,5%. Uma outra forma de evidenciar o bom ajuste da simulação ao experimento, é fazer um comparativo entre as derivadas das curvas de congelamento da experimentação e da simulação (Figura 4.7).

Figura 4.6: Gráficos comparativos entre a simulação para o coeficiente de convecção de 6,42 W/ m<sup>2</sup> K e dos dados experimentais. Fonte: Autoria própria.

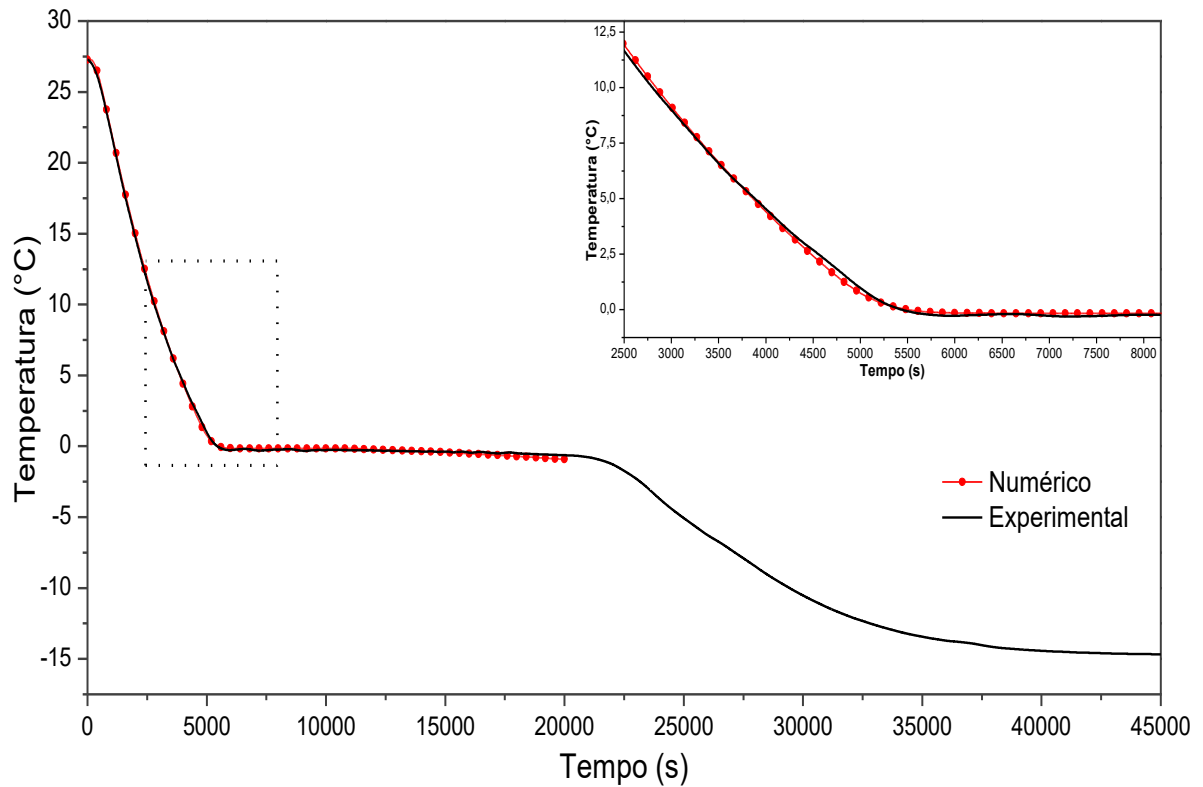
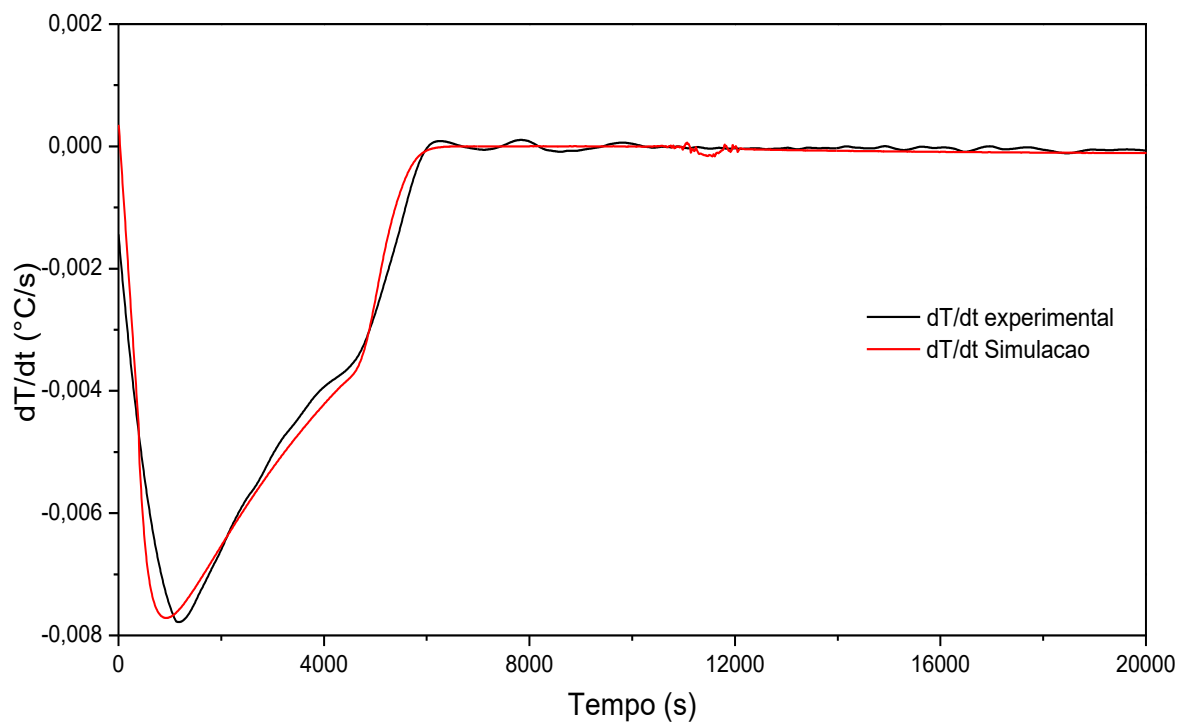


Figura 4.7: Comparativo da derivada da curva de congelamento da experimentação e simulação. Fonte: Autoria Própria

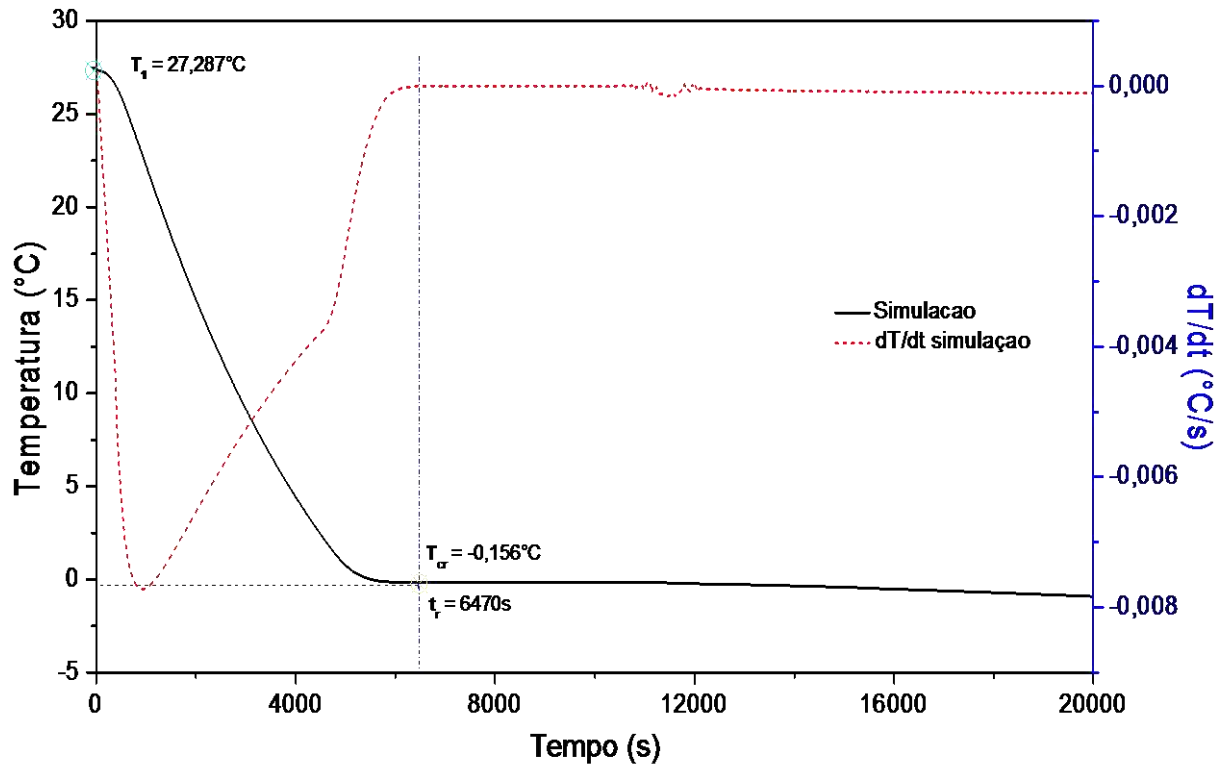




Observa-se que as derivadas das curvas de congelamento da experimentação e simulação possuem uma excelente concordância, evidenciando assim, a validação física do modelo proposto, contudo, o modelo só conseguiu representar bem os períodos de resfriamento e congelamento, não sendo capaz de prever o período de pós-congelamento, assim, os resultados encontrados para um coeficiente de convecção  $h = 6,42 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  são apresentados até um tempo de simulação de  $t = 20000\text{s}$ . Os dados após este tempo não apresentam representatividade do fenômeno de congelamento, em resumo, o modelo proposto é capaz de prever o comportamento da temperatura do produto nos períodos de resfriamento e do congelamento.

Utilizando a metodologia proposta por Rahman *et al.* (2002), a curva de congelamento da simulação e sua derivada foram sobrepostas (Figura 4.8), a fim de se determinar a  $T_{cr}$  e o  $t_r$ , para serem comparados aos obtidos experimentalmente, para isso, adotou-se um critério de convergência para determinar  $T_{cr}$ , sendo considerada a temperatura inicial de congelamento aquele ponto no gráfico onde  $|dT/dt| < 1 \times 10^{-5}$ , tal critério foi estabelecido com o intuito de criar uma padronização para localizar  $T_{cr}$  e  $t_r$ . A temperatura inicial de congelamento encontrada na curva de congelamento numérica foi de  $T_{cr} = -0,156^\circ\text{C}$ , enquanto a experimental foi de  $T_{cr} = -0,216^\circ\text{C}$ , no que diz respeito ao tempo de resfriamento, na simulação foi encontrado  $t_r = 6470\text{s}$ , enquanto o experimental foi de  $t_r = 6360\text{s}$ , os valores encontrados na simulação e experimentalmente para  $T_{cr}$  e  $t_r$  foram bem próximos, evidenciando assim, o bom ajuste obtido.

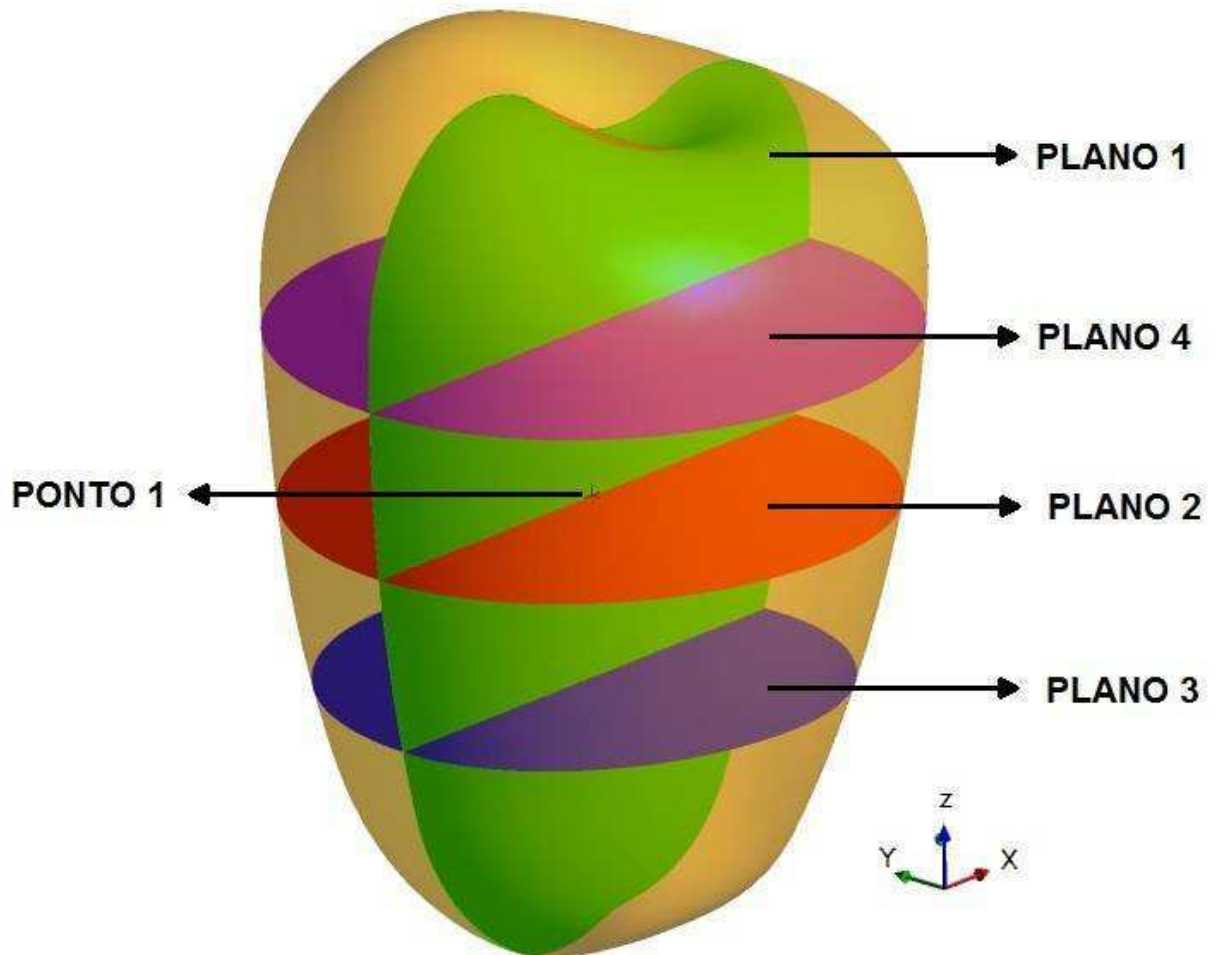
Figura 4.8: Curva de congelamento numérica e sua derivada mostrando  $T_{cr}$  e  $t_f$ . Fonte: Autoria Própria



### 4.2.3 Perfis de Temperatura

Foram criados 4 planos auxiliares para avaliar os gradientes da temperatura no sólido ao longo do tempo, o primeiro deles foi o plano médio longitudinal paralelo ao plano XZ, localizado no ponto  $Y_1 = 26,7186\text{mm}$ , denominado de plano 1, e os outros 3, foram planos transversais, sendo estes paralelos ao plano XY, localizados no ponto  $Z_1 = 35,448\text{ mm}$ ,  $Z_2 = 20\text{ mm}$ , e  $Z_3 = 50\text{ mm}$ , e denominados de plano 2, plano 3 e plano 4, respectivamente. A Figura 4.9 mostra em perspectiva tridimensional os planos citados.

Figura 4.9: Perspectiva tridimensional dos planos 1, 2, 3 e 4. Fonte: Autoria Própria



Foram escolhidos alguns intervalos de tempo, baseado na Figura 4.7, para mostrar os gradientes de temperatura nos planos criados, foram selecionados os tempos  $t_1 = 1000$  s, pela proximidade do início do processo e pelo fato deste intervalo está próximo do ponto mínimo de  $dT/dt$ , de  $t_2 = 4200$  s, pela ocorrência do ponto de inflexão na curva  $dT/dt$ , de  $t_3 = 6470$  s, pois o PONTO 1 alcança  $T_{cr}$ , e os tempos  $t_4 = 10000$  s,  $t_5 = 15000$  s e  $t_6 = 20000$  s, que demonstram o desenvolvimento do gradiente de temperatura até o final da simulação. As Figuras 4.10 a 4.15 exibem os perfis de temperatura nos planos 1, 2, 3 e 4 ao longo do tempo.

Figura 4.10: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_1=1000s$ . Fonte: Autoria Própria

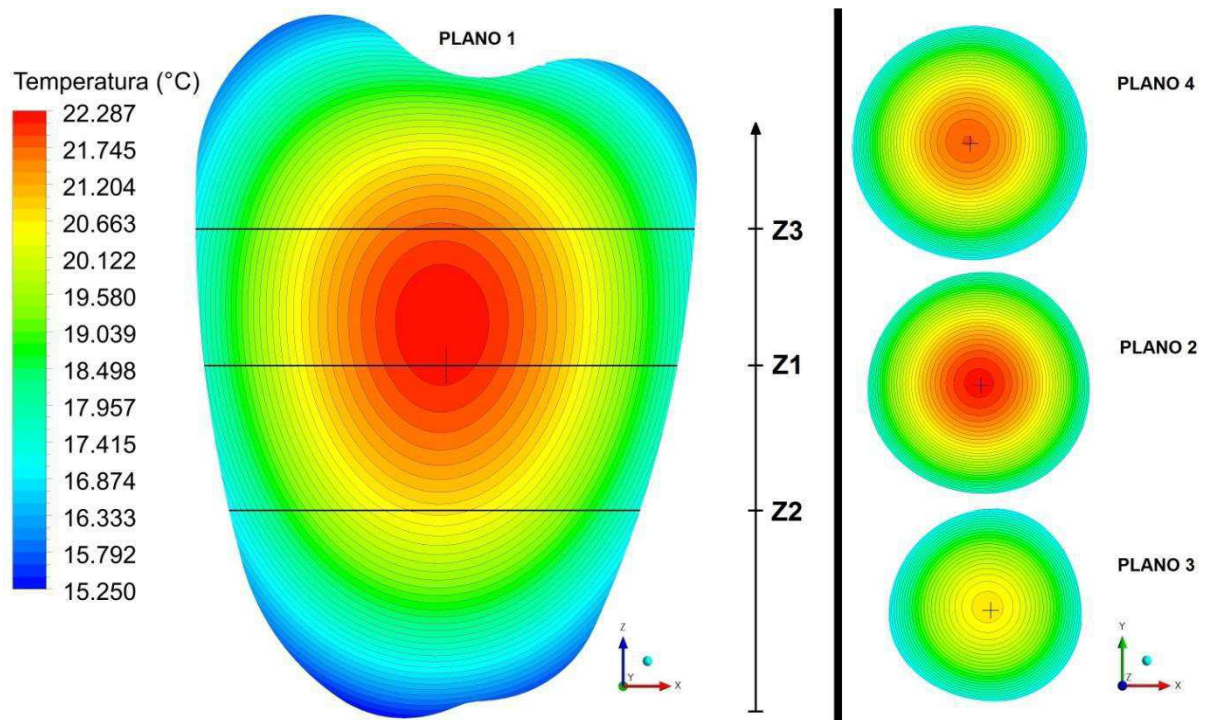


Figura 4.11: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_2=4200s$ . Fonte: Autoria Própria

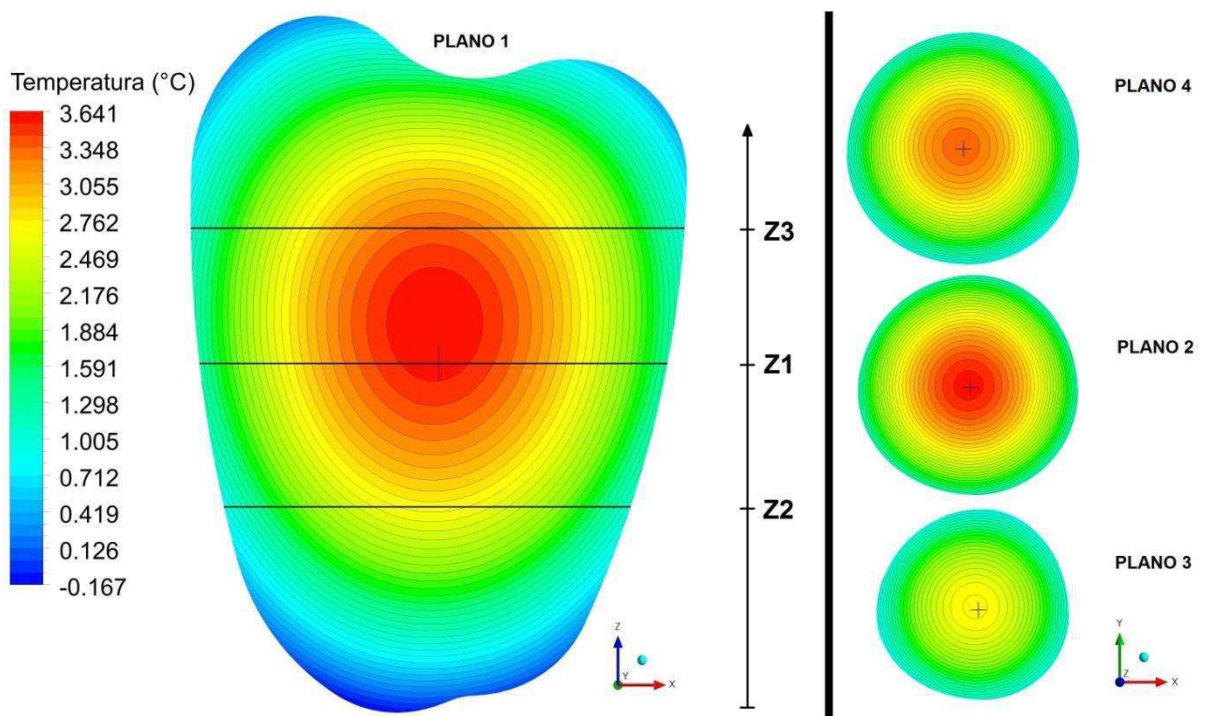


Figura 4.12: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_3=6470s$ . Fonte: Autoria Própria

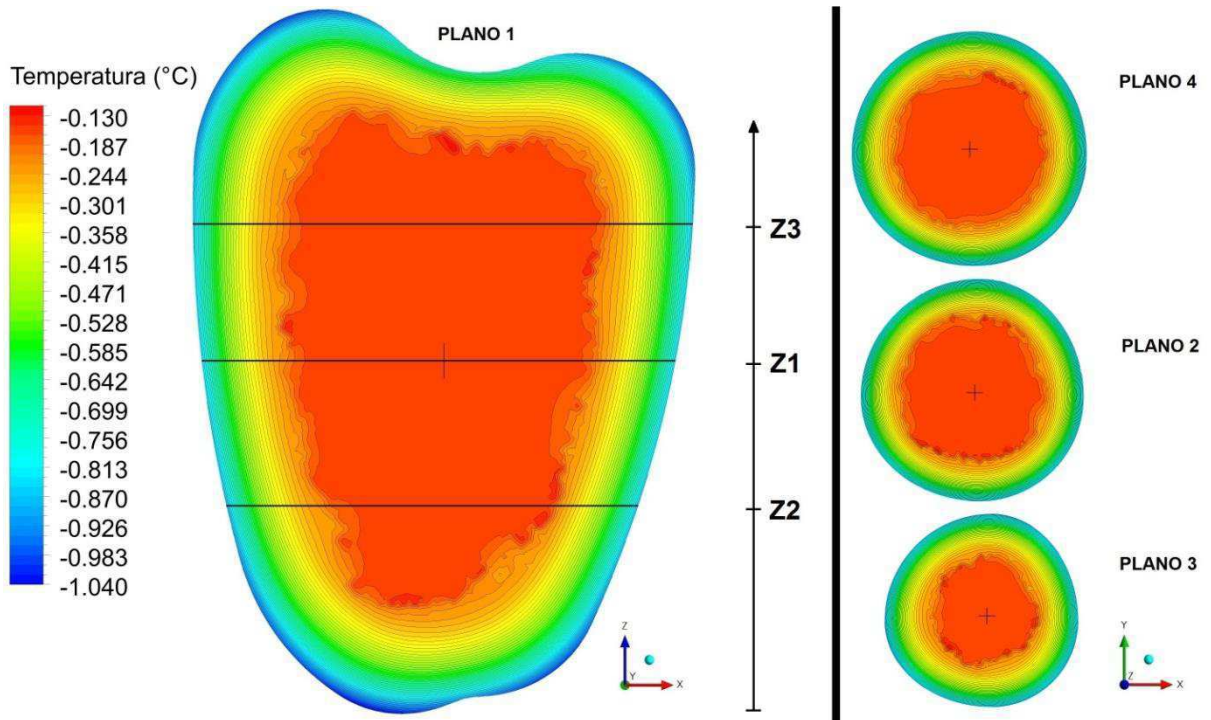


Figura 4.13: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_4=10000s$ . Fonte: Autoria Própria

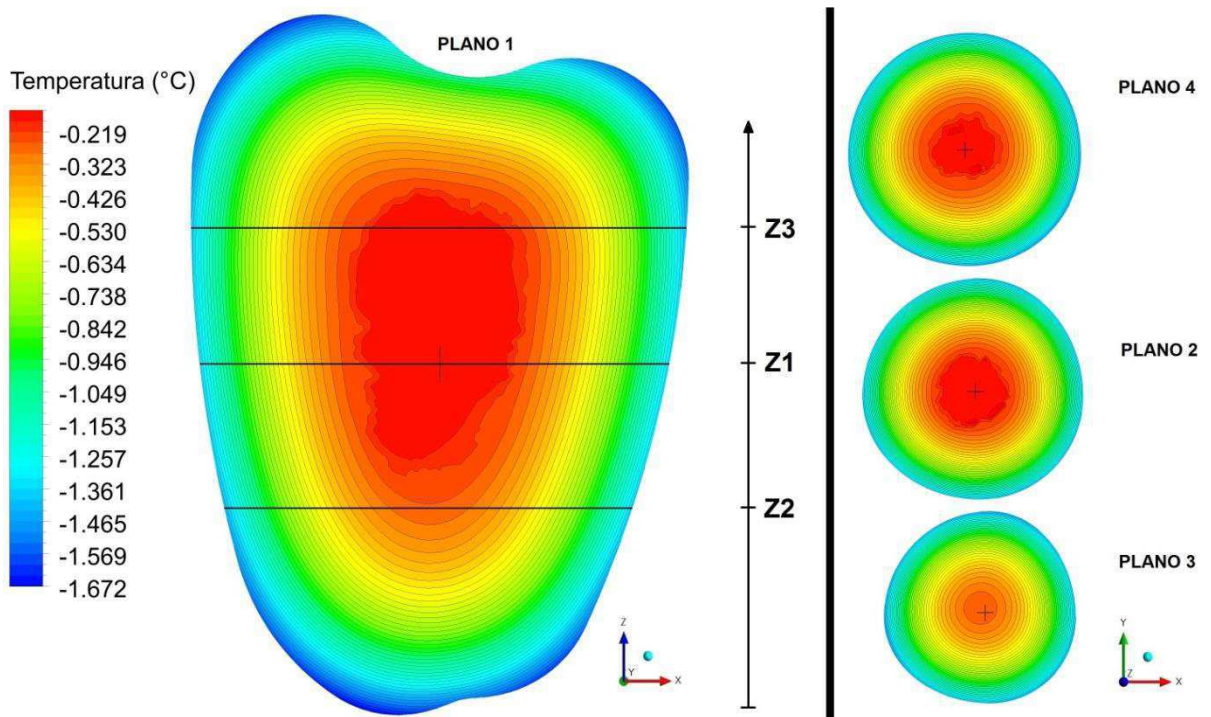


Figura 4.14: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_5=15000s$ . Fonte: Autoria Própria

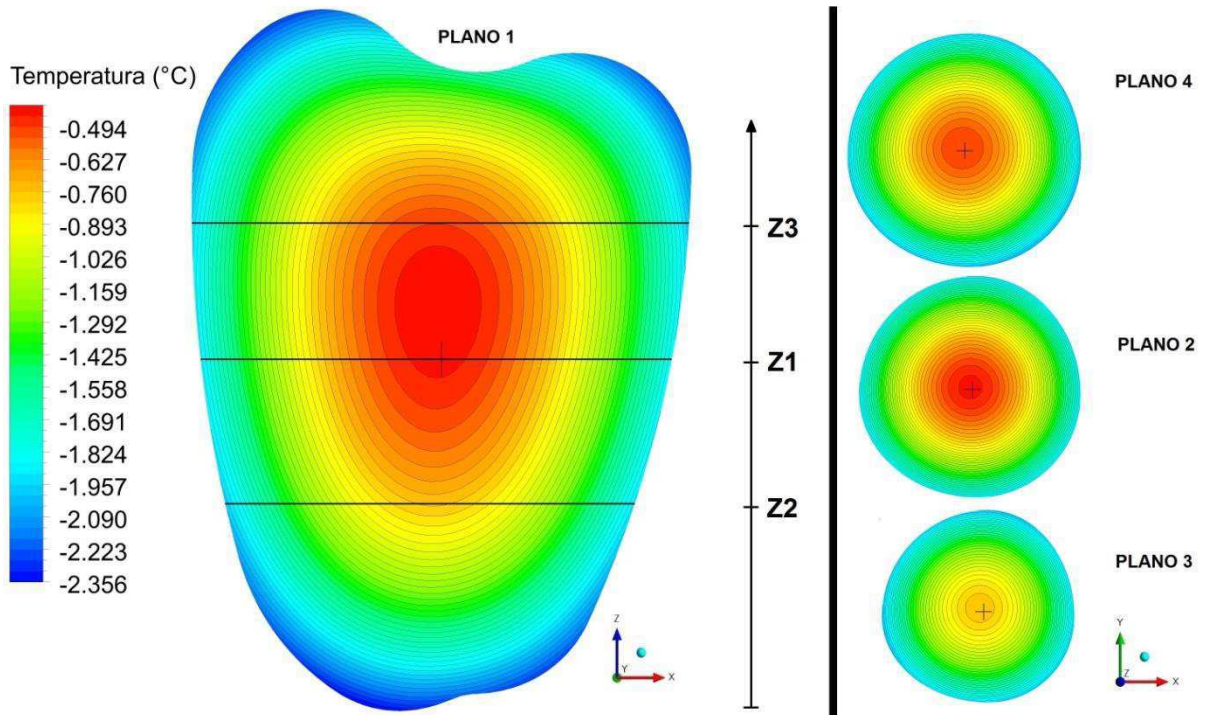
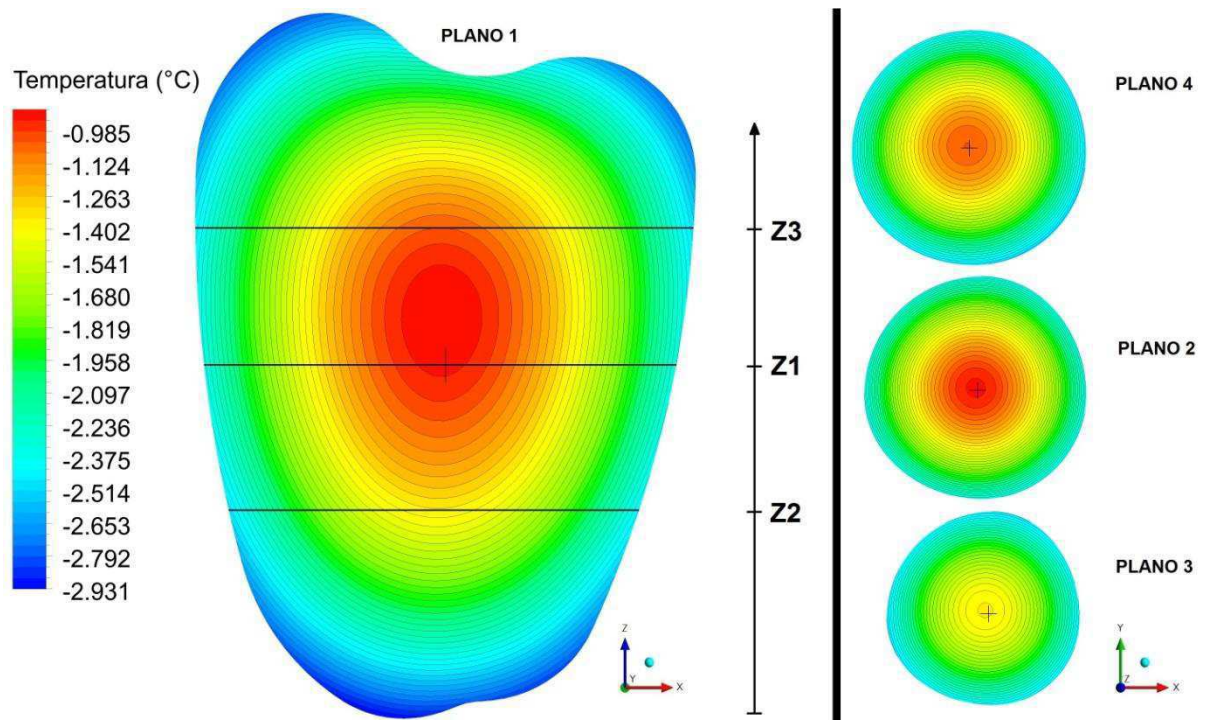


Figura 4.15: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_6=20000s$ . Fonte: Autoria Própria



Da Figura 4.10, observa-se um elevado gradiente de temperatura entre a região mais fria e a mais quente, sendo este gradiente de temperatura muito superior que os

encontrados em outros intervalos de tempo, evidenciando assim que os maiores gradientes de temperatura acontecem na fase do resfriamento no processo de congelamento e ocorre nas proximidades do ponto onde a curva  $dT/dt$  alcança o seu valor mínimo. Da Figura 4.11, nota-se o início do processo de mudança de fase, que começa a ocorrer na extremidade superficial inferior do sólido, região esta que possuem uma curvatura acentuada, assim, é possível associar o ponto de inflexão na curva  $dT/dt$  com sendo o instante que o processo de mudança de fase se inicia no sólido.

Na Figura 4.12 observa-se que o ponto de análise PONTO 1 alcança a temperatura de início de congelamento, podendo afirmar assim que, o processo de mudança de fase foi iniciado em todo o sólido. E as Figuras 4.13 a 4.15 mostram os perfis de temperatura dos planos ao longo da simulação, ficando perceptível que a região superficial do sólido encontra-se sempre mais fria que a região interna em qualquer intervalo de tempo analisado.

#### **4.2.4 Influência do teor de umidade e do coeficiente de convecção no processo de congelamento**

Após a validação física do processo de congelamento, foram realizadas simulações considerando que o processo ocorrera por convecção forçada, no qual se adotou a velocidade do ar ( $V$ ) como sendo de 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s, e a temperatura do ar foi estabelecida em  $-20^{\circ}\text{C}$ . Para estimar o valor do coeficiente de convecção correspondente a cada velocidade, utilizou-se a correlação de Whitaker, para tal, a geometria do pedúnculo do caju foi aproximada à de uma esfera, para que fosse viável a utilização de tal correlação, sendo o volume da esfera igual ao volume do pedúnculo.

As propriedades do ar, tais como: condutividade térmica ( $k$ ), número de Prandtl ( $Pr$ ), viscosidade dinâmica ( $\mu$  e  $\mu_s$ ) e densidade ( $\rho$ ), foram obtidas em Incropera *et al.* (2008) e avaliadas na temperatura do meio refrigerante ( $T_{\infty}$ ), com exceção de  $\mu_s$ , que foi avaliada na temperatura superficial ( $T_s$ ). Todos os dados são listados na Tabela 4.5 e foram aplicados nas Equações 3.7 e 3.8, obtendo assim o coeficiente de convecção para cada velocidade analisada.

Tabela 4.5: Dados utilizados para obter o coeficiente de convecção pela correlação de Whitaker

<b>Dados</b>	<b>V = 1 m/s</b>	<b>V = 5 m/s</b>	<b>V = 10 m/s</b>
$T_s$ (°C)	27,287	27,287	27,287
$T_\infty$ (°C)	-20	-20	-20
$k$ (W/m K)	$2,2552 \times 10^{-2}$	$2,2552 \times 10^{-2}$	$2,2552 \times 10^{-2}$
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,38	1,38	1,38
$\mu$ (kg/s.m)	$1,6118 \times 10^{-5}$	$1,6118 \times 10^{-5}$	$1,6118 \times 10^{-5}$
$\mu_s$ (kg/s.m)	$1,8514 \times 10^{-5}$	$1,8514 \times 10^{-5}$	$1,8514 \times 10^{-5}$
<b>Pr</b>	0,719181	0,719181	0,719181
$D$ (m)	$6,077 \times 10^{-2}$	$6,077 \times 10^{-2}$	$6,077 \times 10^{-2}$
$Re_D$	5203,74	26018,72	52037,45
$\overline{Nu}_D$	41,6825	101,2267	150,0523
$\overline{h}_D$ (W/m <sup>2</sup> K)	15,467	37,562	55,679

Com relação ao teor de umidade a base úmida, este foi variado para os valores de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%, a fim de identificar sua influência no processo de congelamento, visto que, diversas propriedades termofísicas são influenciadas pelo teor de umidade do produto. As propriedades termofísicas influenciadas pelo teor de umidade são: densidade, calor específico, condutividade térmica e calor latente de solidificação.

A partir das equações propostas por Aragão (2007) e LeBlanc *et al.*(1990b), foi possível obter os valores das propriedades termofísicas em função do teor de umidade. Para o cálculo da condutividade térmica, utilizou-se a mesma regra da validação física do problema, no qual a condutividade térmica adotada na simulação é igual à média aritmética dos valores encontrados pela Equação 4.3 e dos valores experimentais de Mattos (2007) e Kurozawa *et al.* (2008). A Tabela 4.6 mostra o valor de cada propriedade de acordo com o teor de umidade.



Tabela 4.6: Variação das propriedades termofísicas do pedúnculo do caju em função do teor de umidade

<b>Propriedade</b>	<b>X' = 80%</b>	<b>X' = 82%</b>	<b>X' = 84%</b>	<b>X' = 86%</b>	<b>X' = 90%</b>
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	811,27	812,62	813,50	813,99	814,29
$k_r$ (W/m K)	0,590376	0,588865	0,586678	0,583720	0,575406
$k_c$ (W/m K)	0,567852- 0,10428T	0,566242- 0,10474T	0,563912- 0,1054T	0,56076- 0,10629T	0,5519- 0,10881T
$k_{pc}$ (W/m K)	0,9347	0,9347	0,9347	0,9347	0,9347
$C_{pr}$ (J/kg K)	3809,11	3753,00	3682,24	3591,88	3326,65
$C_{pc}$ (J/kg K)	83968,2	85968,6	87961,7	89945,0	93869,3
$C_{ppc}$ (J/kg K)	1850	1850	1850	1850	1850
$L_S$ (J/kg)	267920	274618	281316	288014	301410

Os dados da temperatura em função do tempo foram extraídos do PONTO 1 para o desenvolvimento dos gráficos da cinética de congelamento e das análises para determinação dos tempos e temperaturas inerentes do processo de congelamento. As Figuras 4.16 a 4.18, mostram as curvas sobrepostas da temperatura em função do tempo para as umidades relativas de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%, para as velocidades do ar de 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s, respectivamente. Para uma melhor visualização das diferenças entre as curvas, foi feito um destaque de uma região do gráfico, e este foi inserido em sua parte superior direito, assim, é possível observar com maior clareza o comportamento de cada uma das curvas.

Figura 4.16: Comparativo das curvas de congelamento para a velocidade do ar de 1 m/s e os teores de umidade de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%. Fonte: Autoria Própria

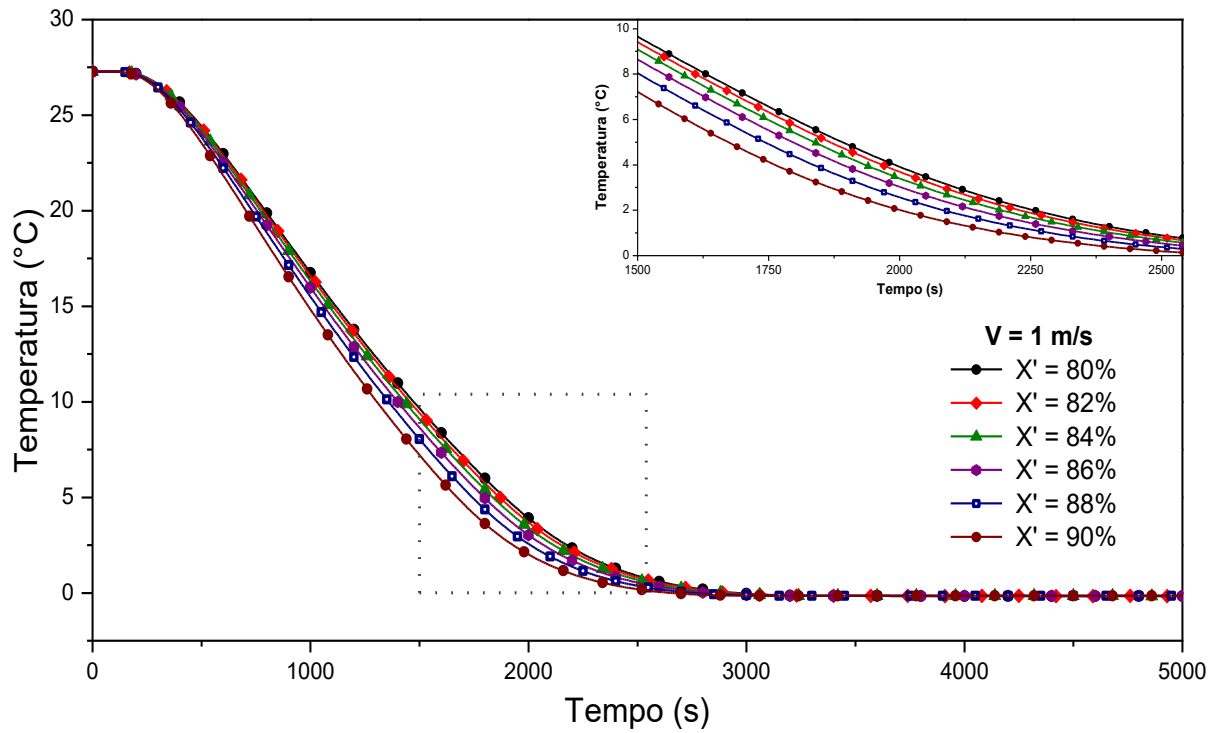


Figura 4.17: Comparativo das curvas de congelamento para a velocidade do ar de 5 m/s e os teores de umidade de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%. Fonte: Autoria Própria

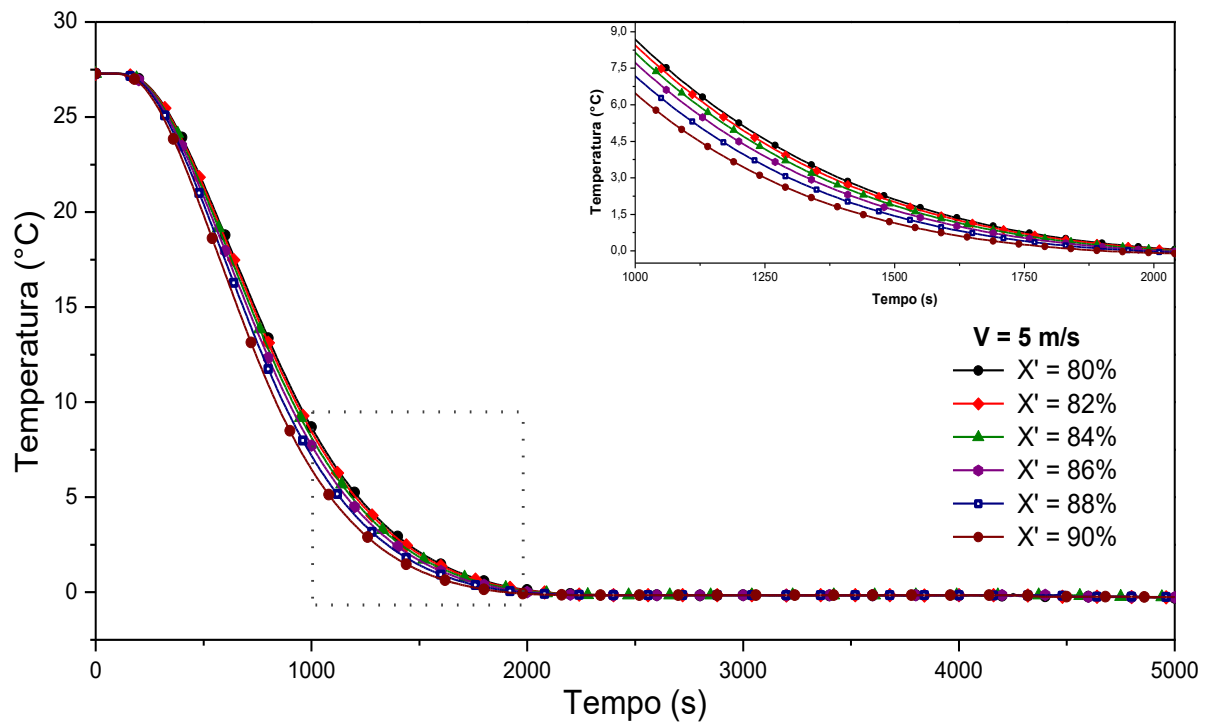
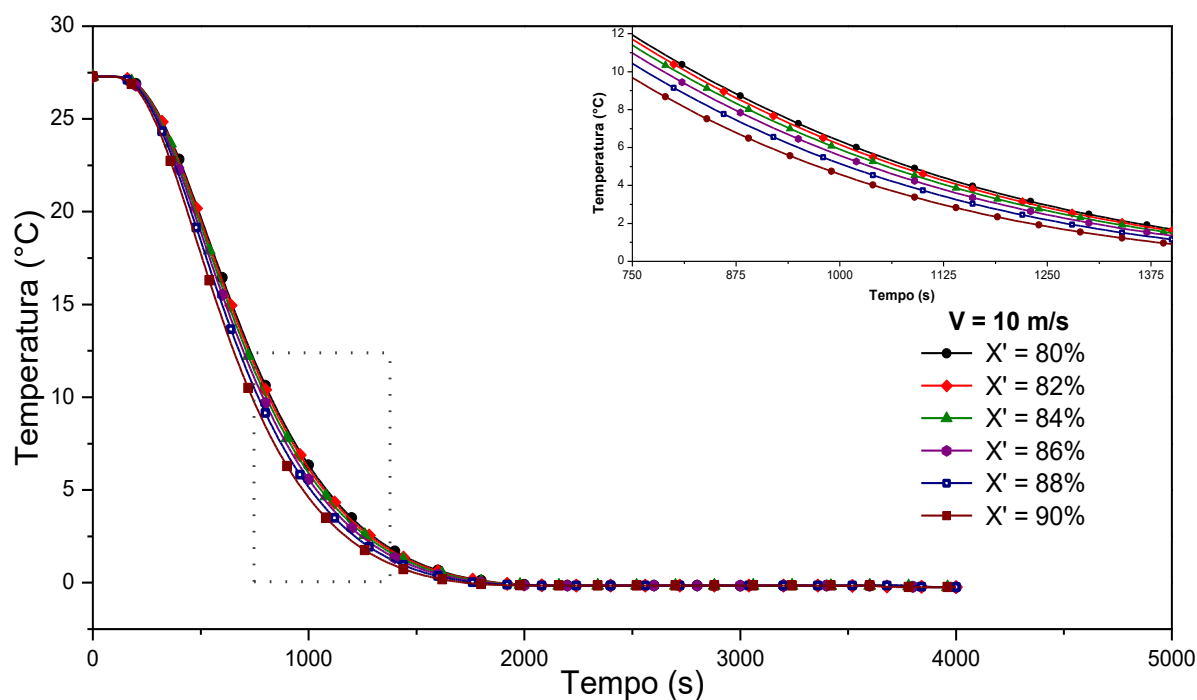


Figura 4.18: Comparativo das curvas de congelamento para a velocidade do ar de 10 m/s e os teores de umidade de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%. Fonte: Autoria Própria



Observa-se que para todas as velocidades do ar estudadas, as temperaturas das amostras que apresentam um teor de umidade mais elevado, decaem mais rapidamente do que aquelas que possuem um teor de umidade menos elevados, portanto, quanto maior for o teor de umidade do produto, mais rapidamente será o processo de resfriamento, tal fato ocorre devido a variação das propriedades termofísicas no sólido em função do teor de umidade. É perceptível o fato de que as temperaturas das amostras analisadas alcançam a temperatura inicial de congelamento mais rapidamente quanto maior for a velocidade do ar, já que o aumento da velocidade do ar implica numa intensificação da transferência de calor. Para encontrar  $T_{cr}$  e  $t_r$ , foi utilizado a metodologia proposta por Rahman *et al.* (2002), onde, foi considerado  $T_{cr}$  e  $t_r$  o ponto onde a derivada da curva da temperatura em função do tempo atende o critério de convergência adotado de  $|dT/dt| < 10^{-5}$ , tal critério foi utilizado em todas as curvas onde foram alteradas a velocidade do ar e o teor de umidade. As Figuras 4.19 a 4.24 mostram a sobreposição das curvas da temperatura em função do tempo e de sua derivada, para os casos no qual a velocidade do ar foi de 1 m/s, e onde o teor de umidade do produto foi variado em 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%, respectivamente.

Figura 4.19: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 1 m/s e teor de umidade de 80%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

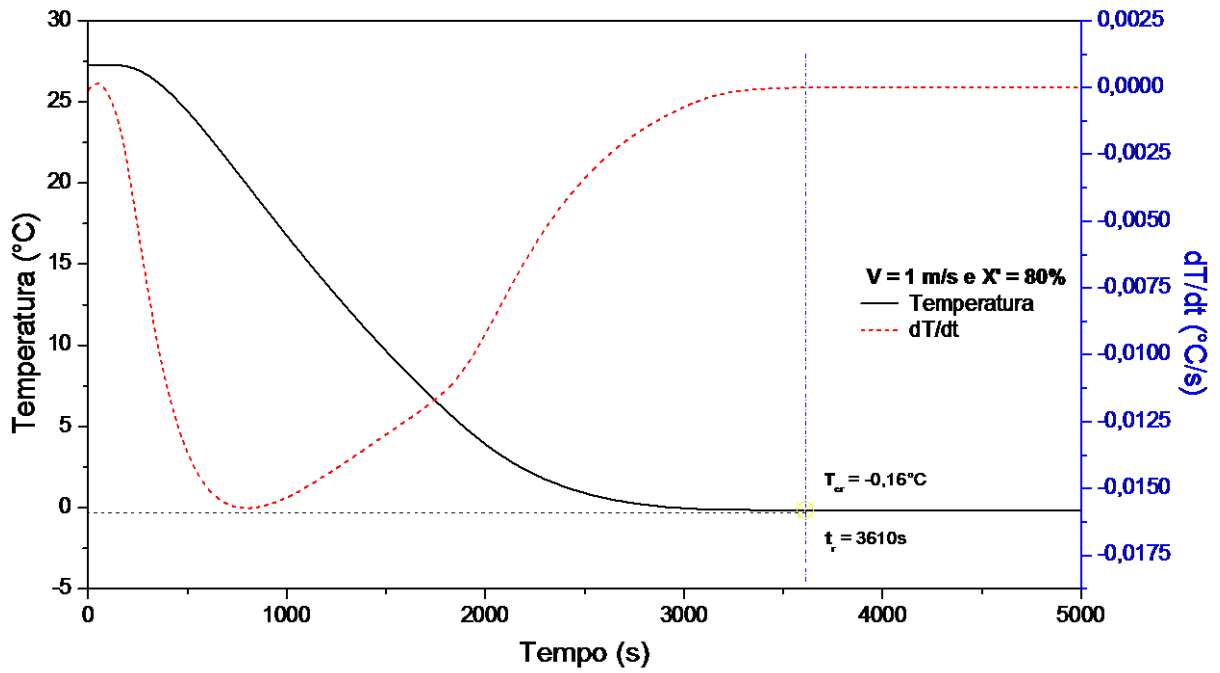


Figura 4.20: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 1 m/s e teor de umidade de 82%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

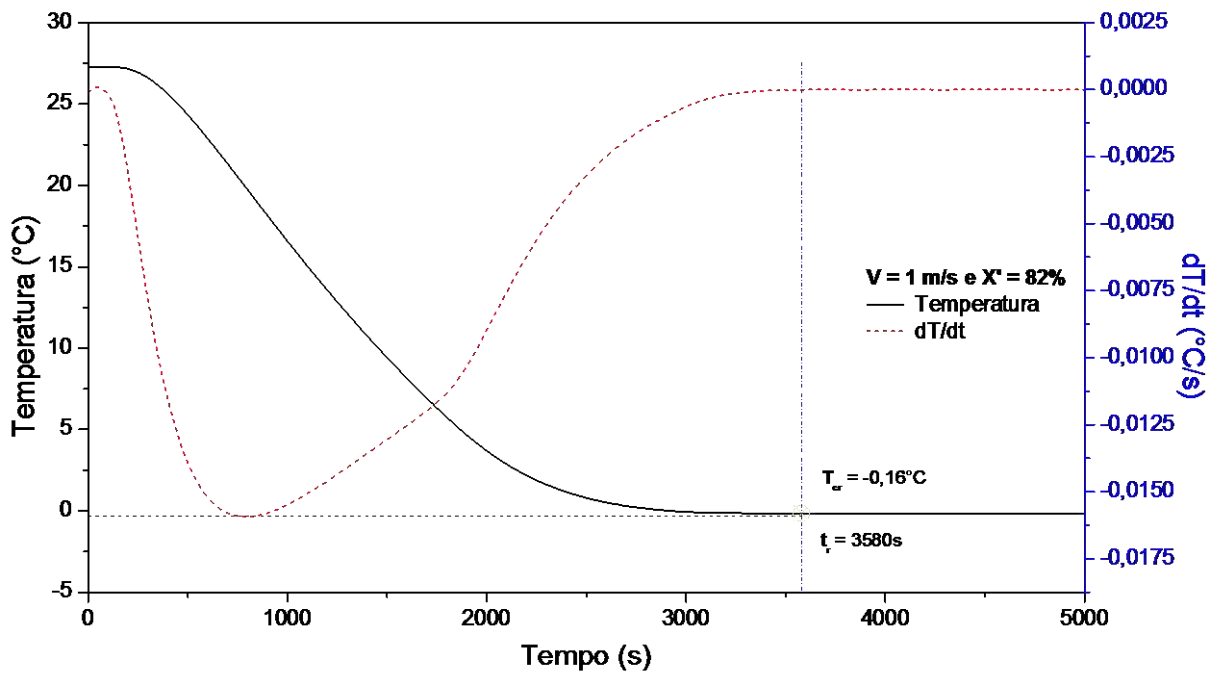


Figura 4.21: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 1 m/s e teor de umidade de 84%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

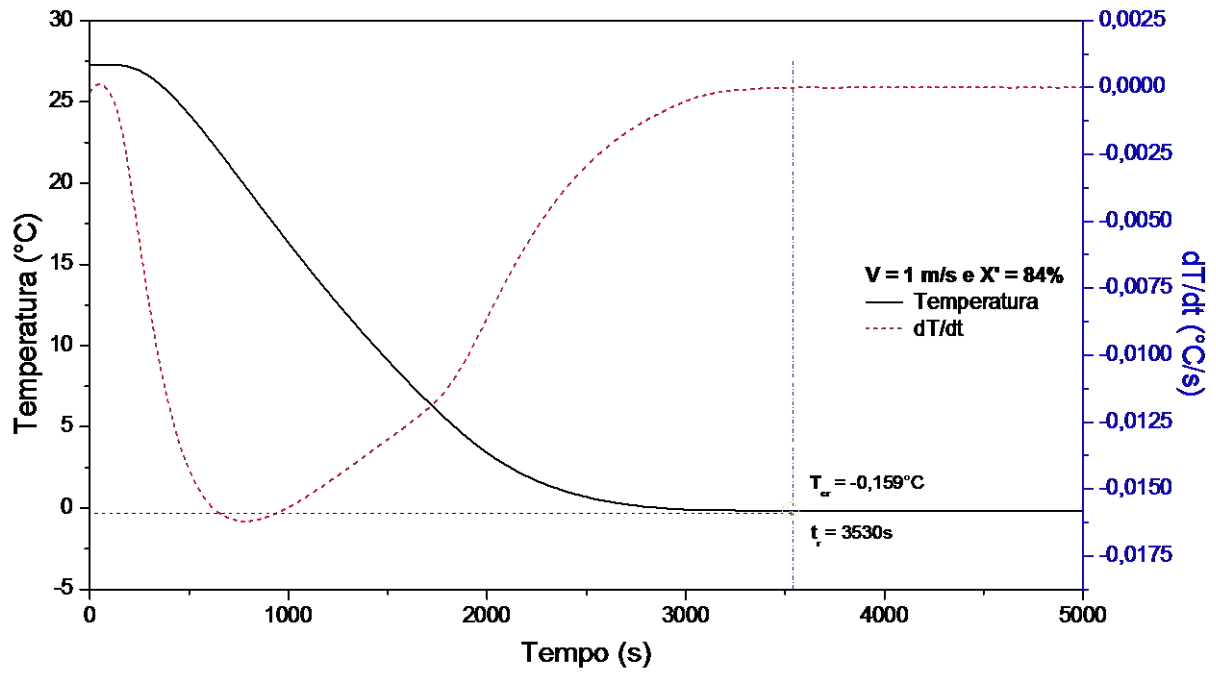


Figura 4.22: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 1 m/s e teor de umidade de 86%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

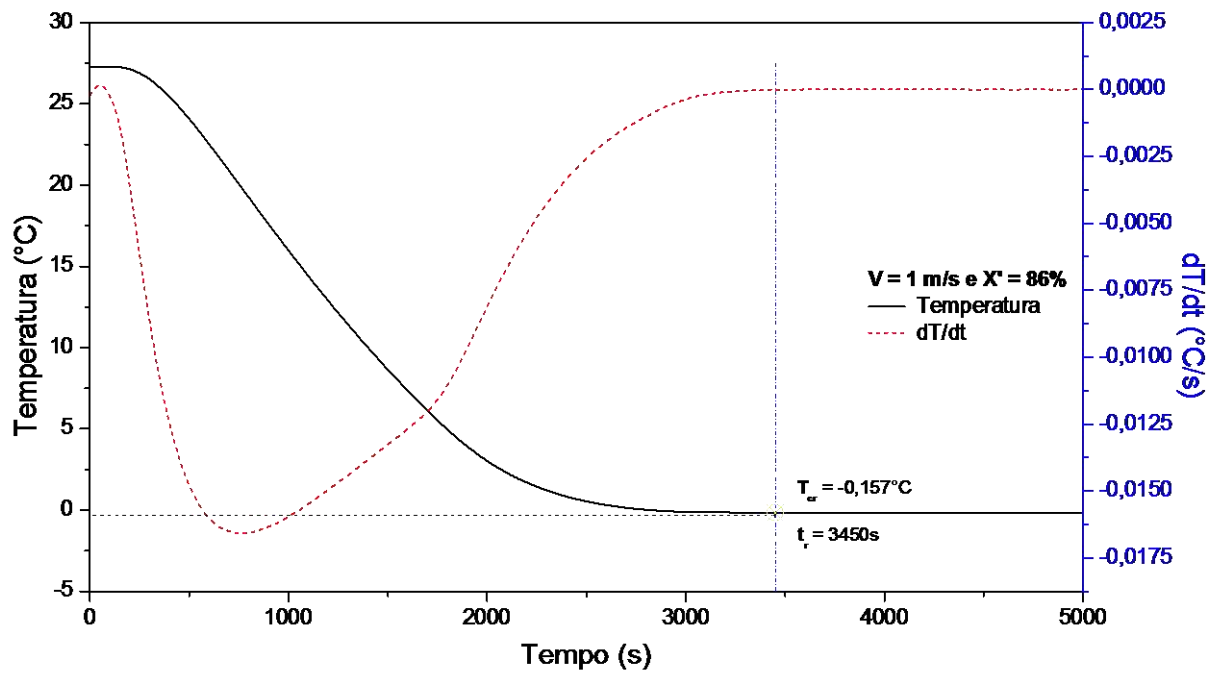


Figura 4.23: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 1 m/s e teor de umidade de 88%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

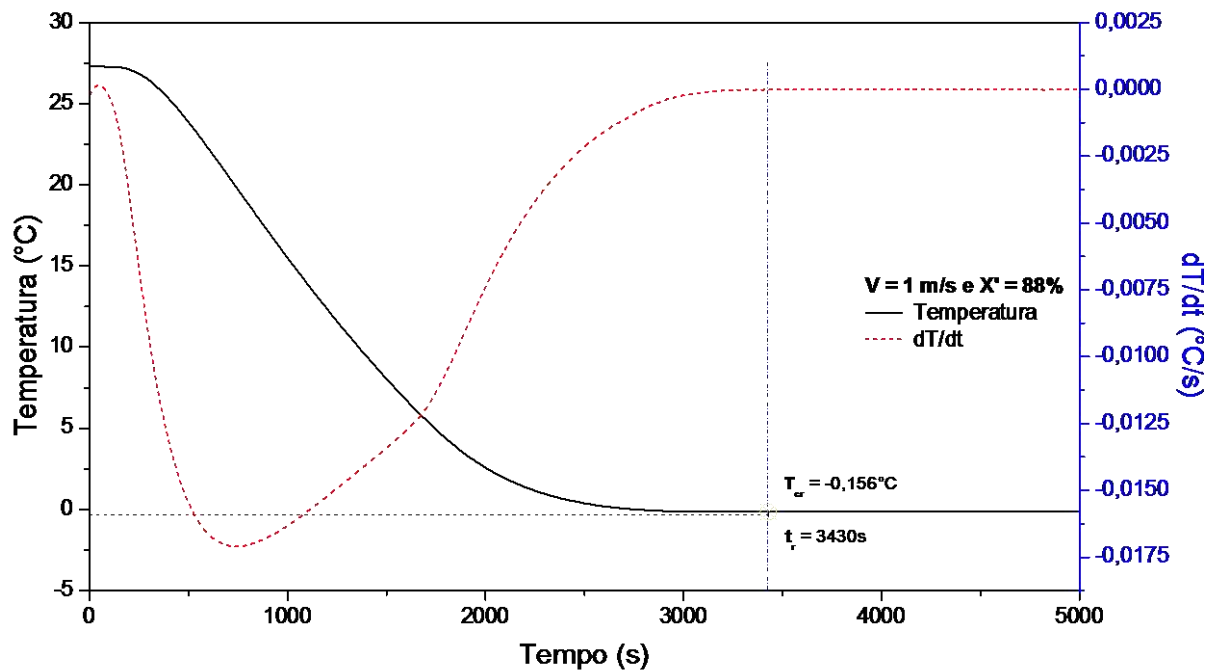
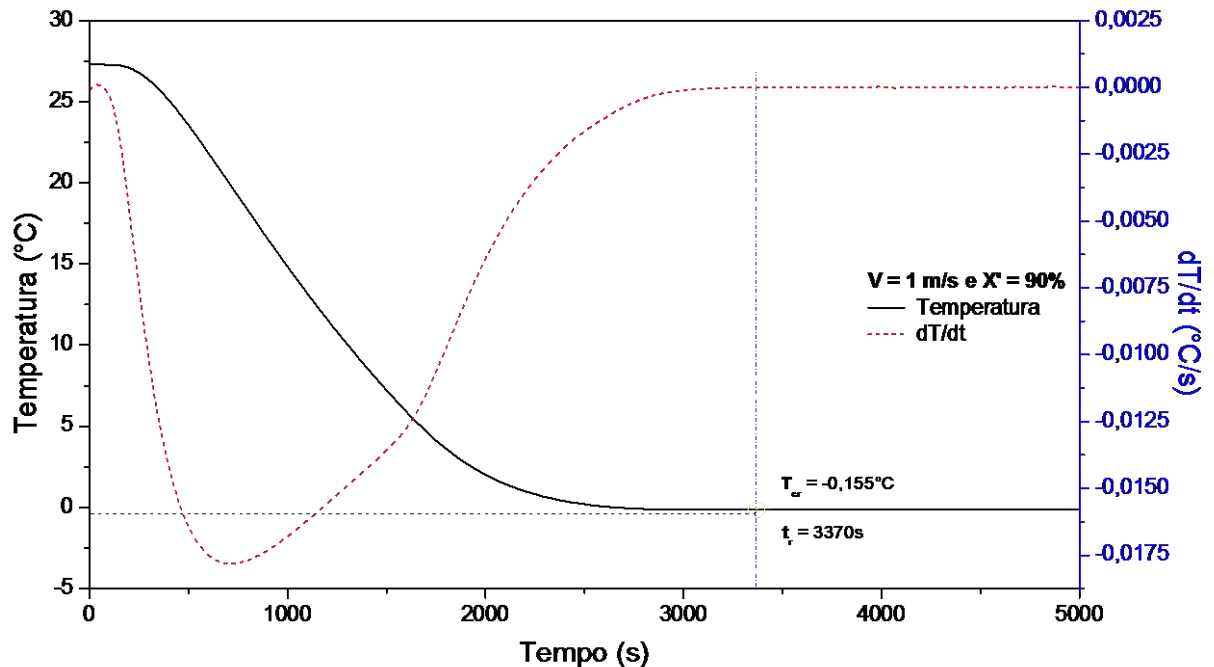


Figura 4.24: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 1 m/s e teor de umidade de 90%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria



As Figuras 4.25 a 4.30 mostram a sobreposição das curvas da temperatura em função do tempo e sua derivada para as simulações no qual a velocidade do ar foi de

5 m/s, e onde o teor de umidade do produto foi variado em 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%, respectivamente

Figura 4.25: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 5 m/s e teor de umidade de 80%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

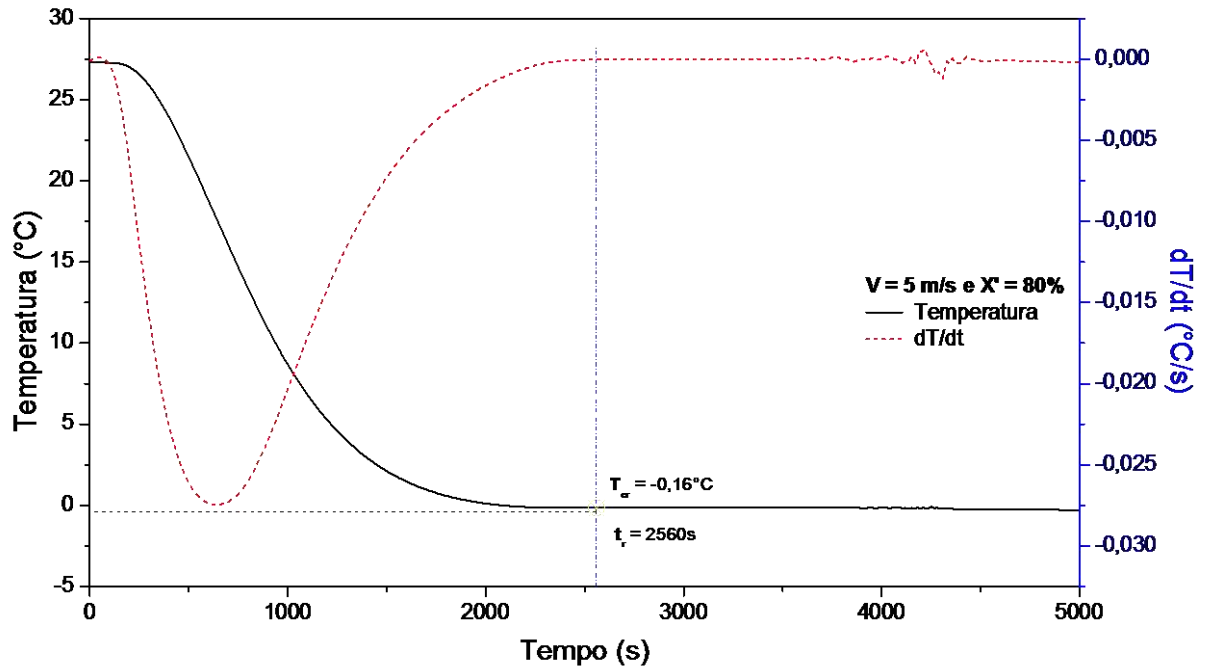


Figura 4.26: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 5 m/s e teor de umidade de 82%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

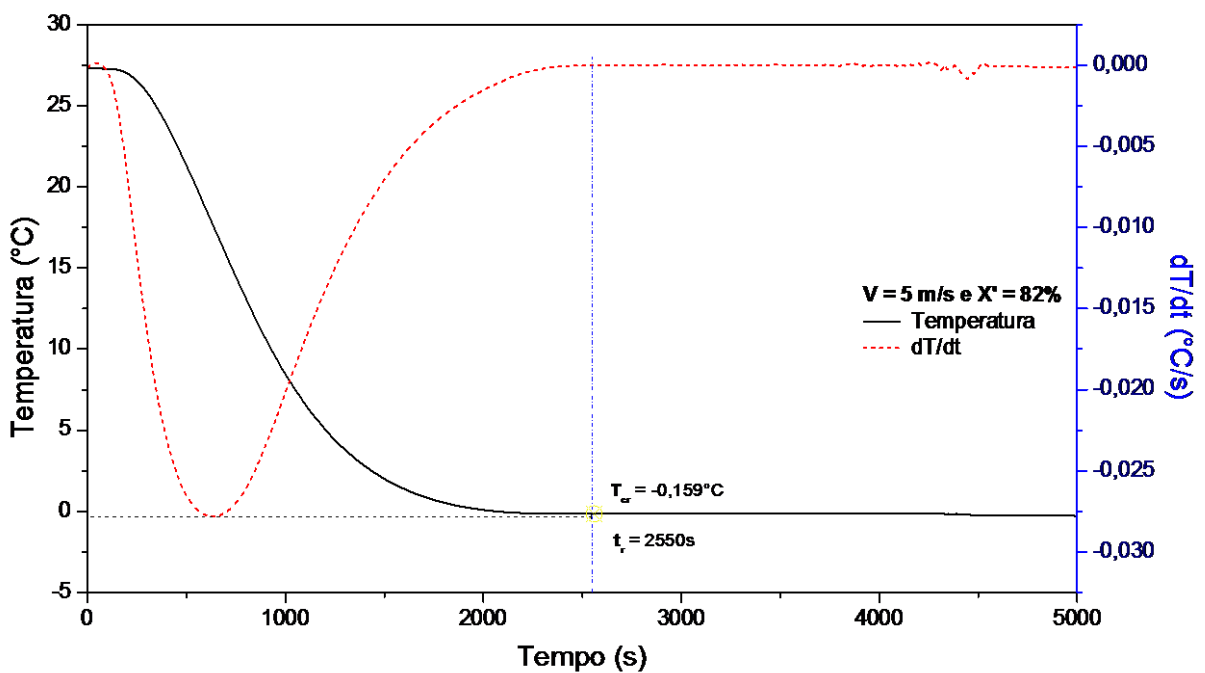


Figura 4.27: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 5 m/s e teor de umidade de 84%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

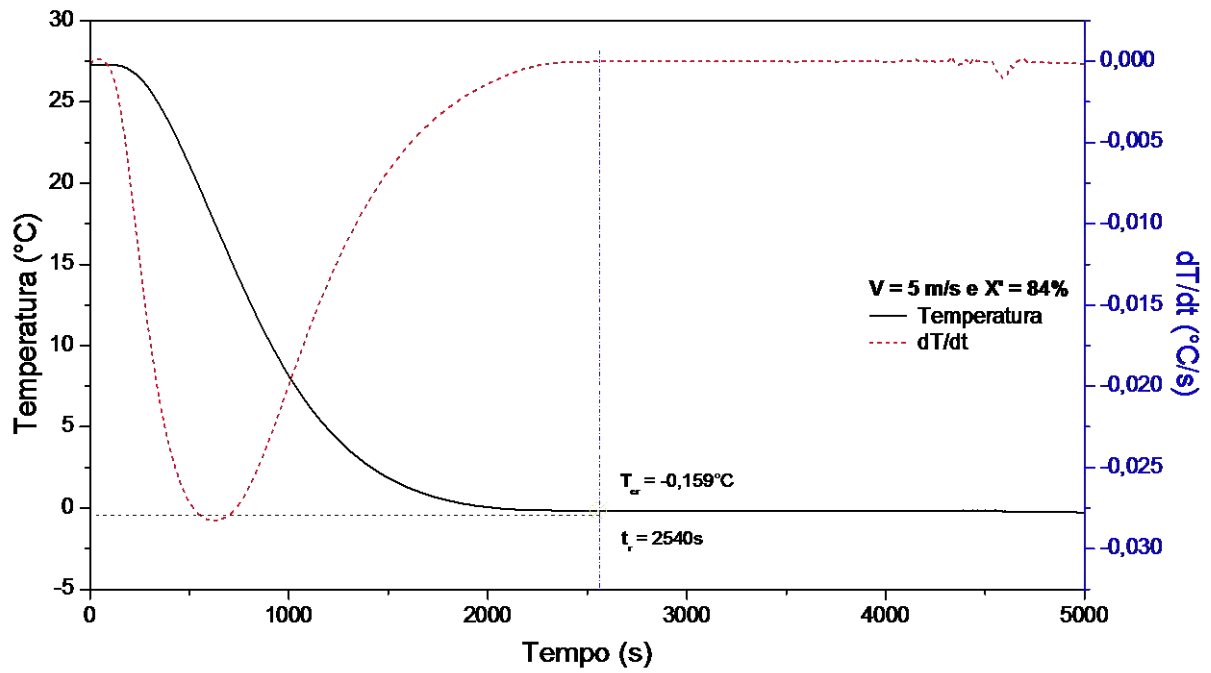


Figura 4.28: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 5 m/s e teor de umidade de 86%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

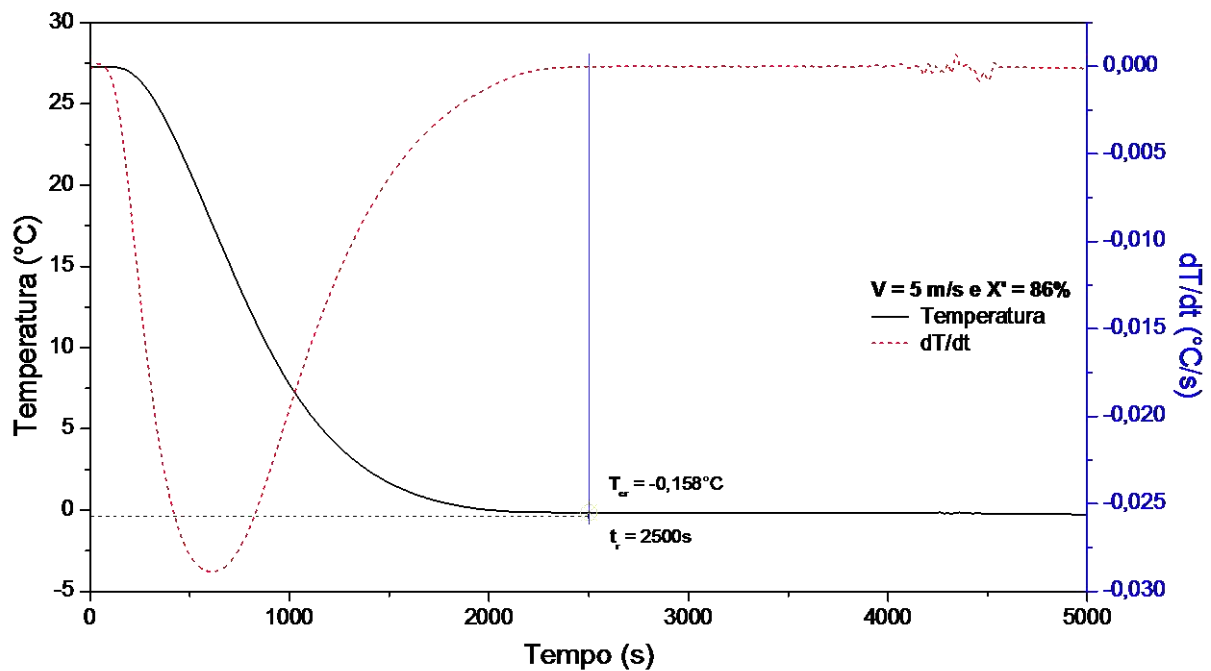




Figura 4.29: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 5 m/s e teor de umidade de 88%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

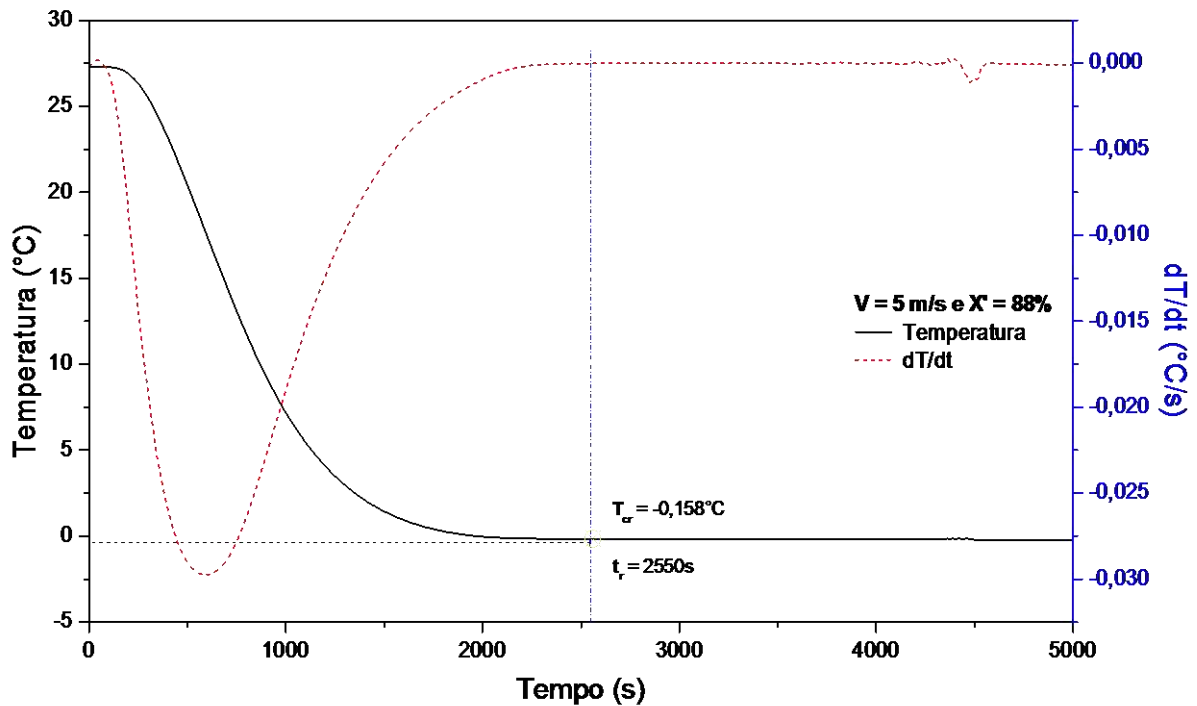
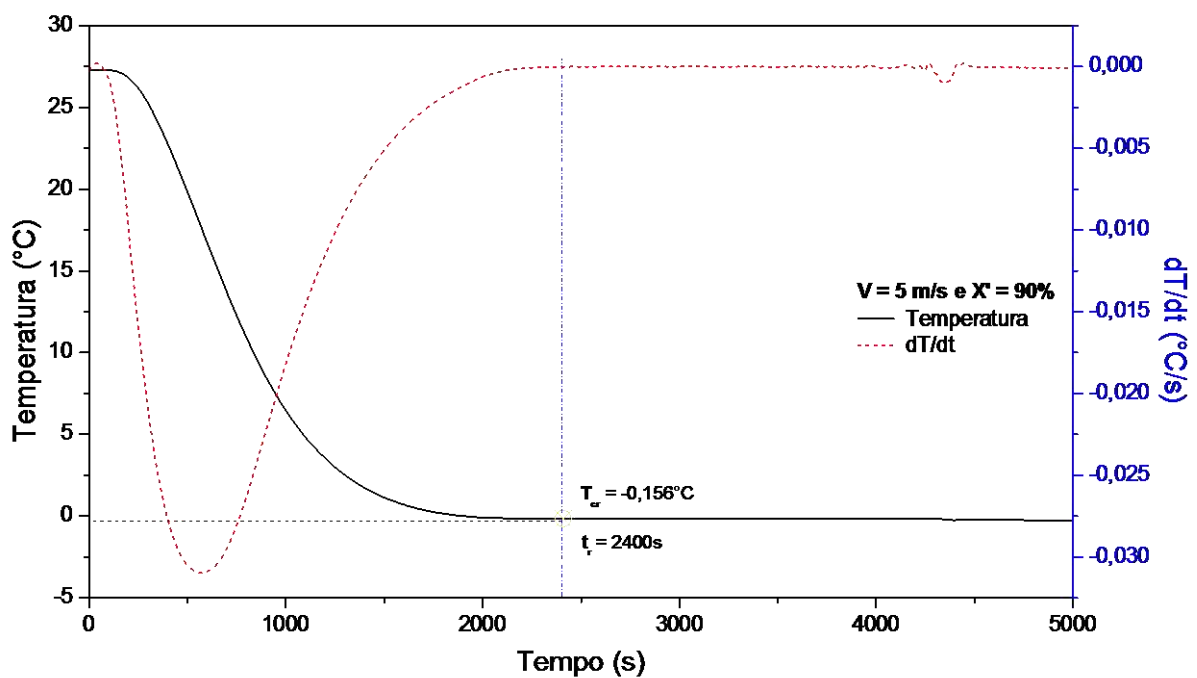


Figura 4.30: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 5 m/s e teor de umidade de 90%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria



As Figuras 4.31 a 4.36 mostram a sobreposição das curvas da temperatura em função do tempo e sua derivada para as simulações no qual a velocidade do ar foi de

10 m/s, e onde o teor de umidade do produto foi variado em 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%, respectivamente.

Figura 4.31: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 10 m/s e teor de umidade de 80%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

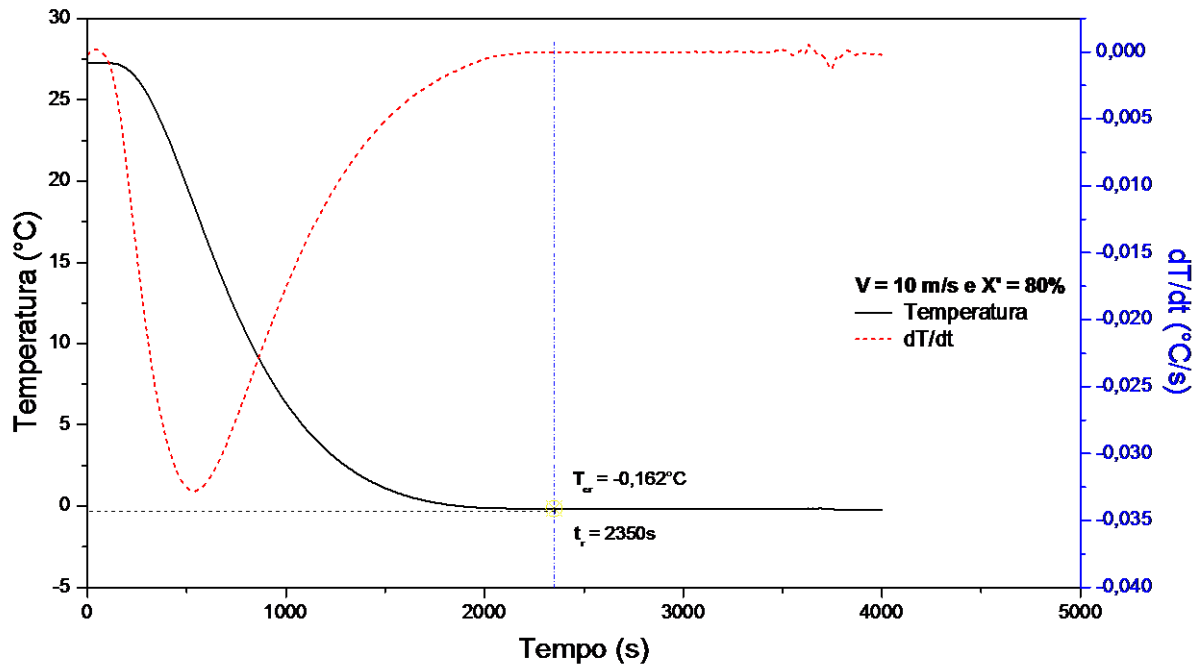


Figura 4.32: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 10 m/s e teor de umidade de 82%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

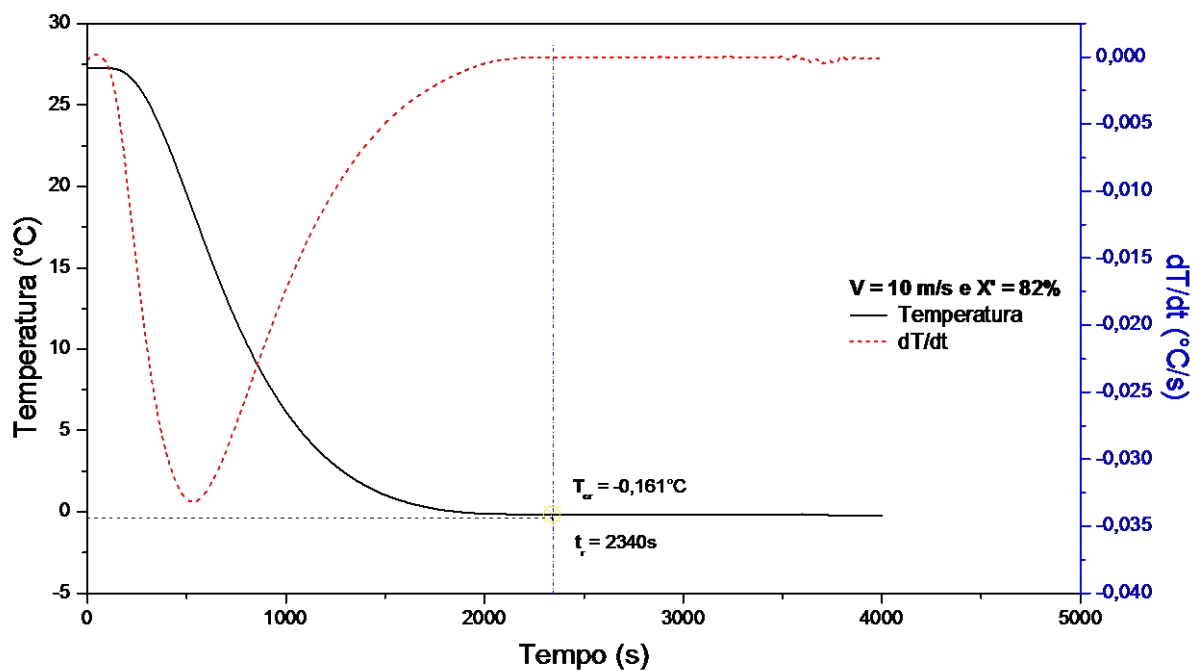


Figura 4.33: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 10 m/s e teor de umidade de 84%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

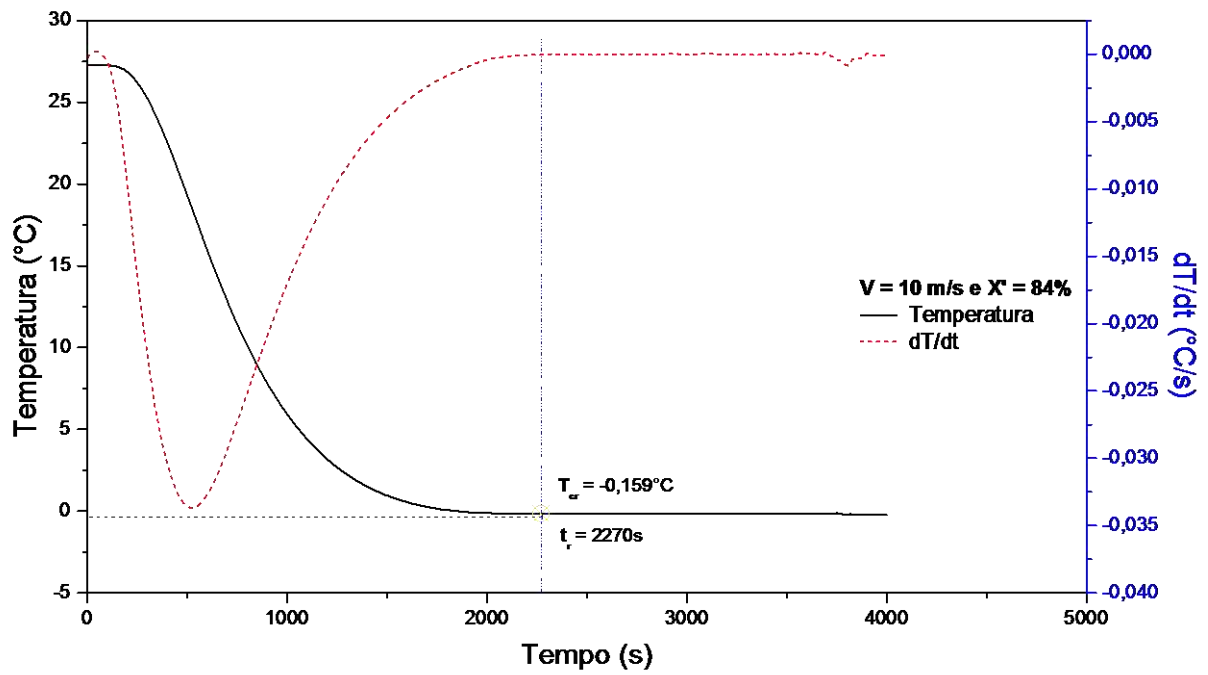


Figura 4.34: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 10 m/s e teor de umidade de 86%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

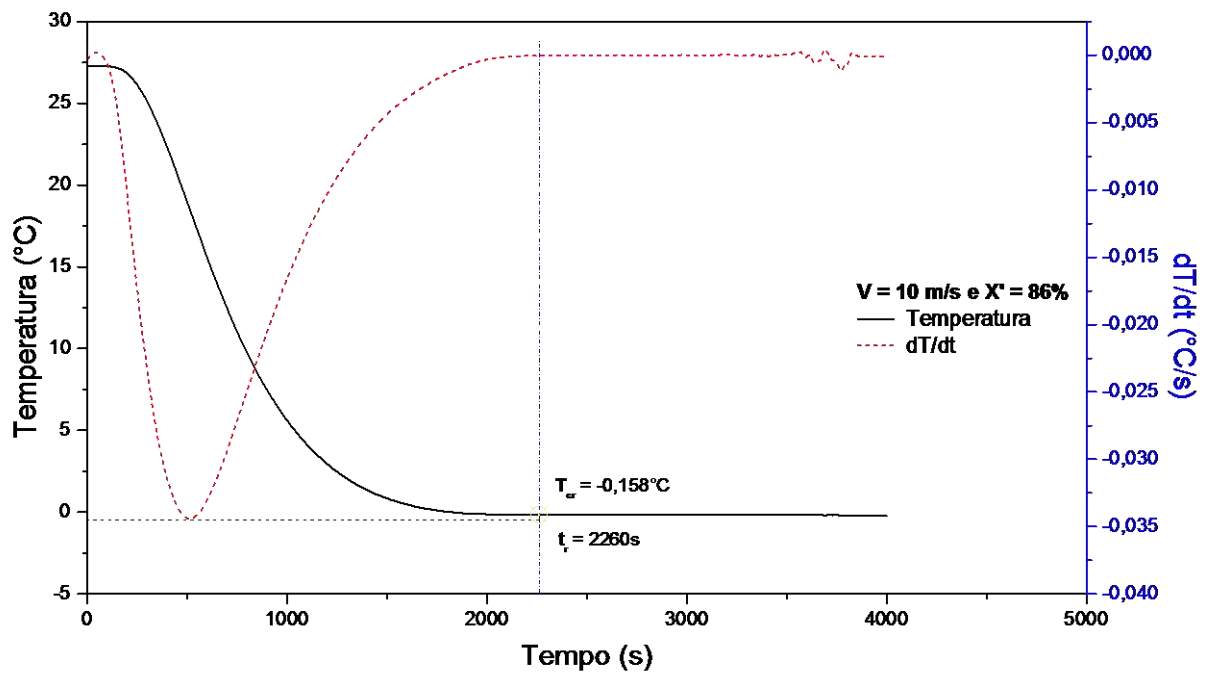


Figura 4.35: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 10 m/s e teor de umidade de 88%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria

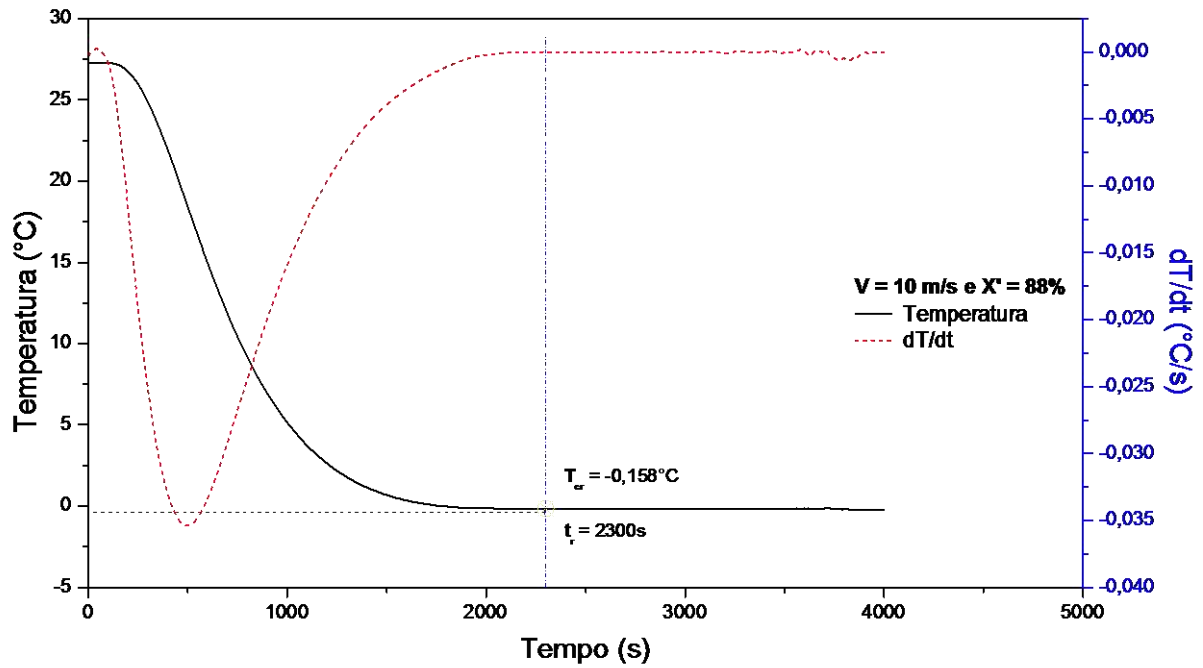
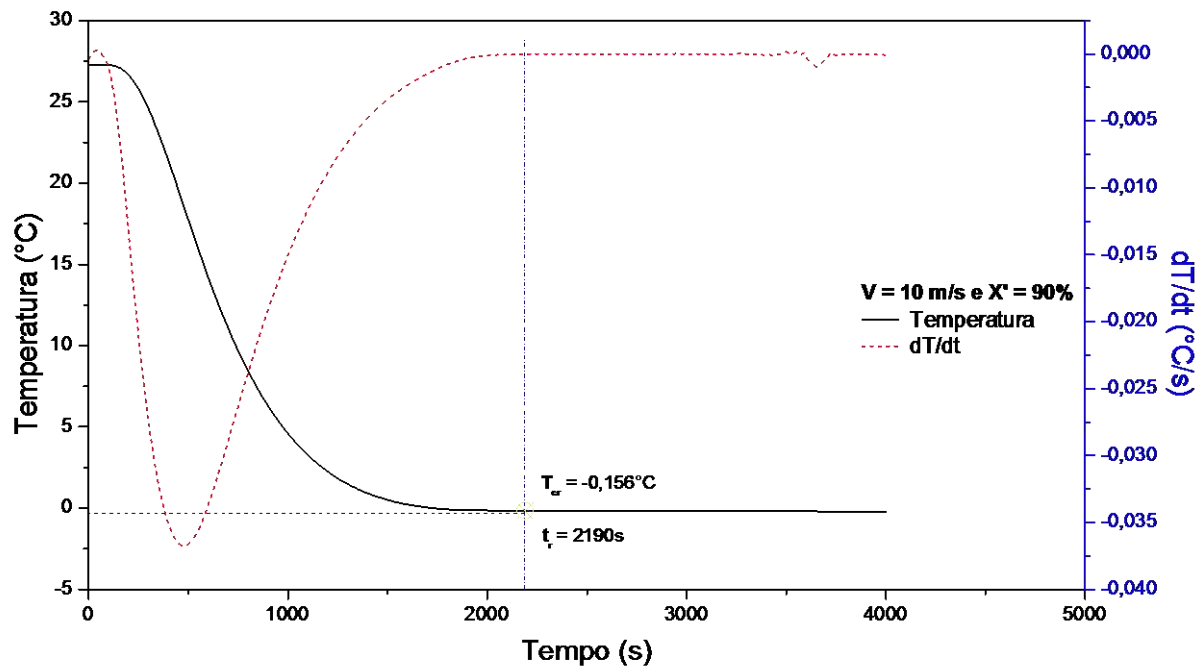


Figura 4.36: Curva de congelamento numérica e sua derivada, para velocidade do ar de 10 m/s e teor de umidade de 90%, mostrando  $T_{cr}$  e  $t_r$ . Fonte: Autoria Própria



Para uma melhor visualização dos resultados, estes foram sumarizados em tabelas, no qual, as Tabelas 4.7 a 4.9, apresentam as  $T_{cr}$  e  $t_r$  de todos os teores de umidade analisados para as velocidades de 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s, respectivamente.

Tabela 4.7: Temperaturas inicial de congelamento e tempo de resfriamento para as amostras com velocidade do ar de 1 m/s e teores de umidade de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%

<b>V = 1 m/s</b>		
$X'$	$T_{cr}$ (°C)	$t_r$ (s)
80%	-0,16	3610
82%	-0,16	3580
84%	-0,159	3530
86%	-0,157	3450
88%	-0,156	3430
90%	-0,155	3370

Tabela 4.8: Temperaturas inicial de congelamento e tempo de resfriamento para as amostras com velocidade do ar de 5 m/s e teores de umidade de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%

<b>V = 5 m/s</b>		
$X'$	$T_{cr}$ (°C)	$t_r$ (s)
80%	-0,16	2560
82%	-0,159	2550
84%	-0,159	2540
86%	-0,158	2500
88%	-0,158	2550
90%	-0,156	2400

Tabela 4.9: Temperaturas inicial de congelamento e tempo de resfriamento para as amostras com velocidade do ar de 10 m/s e teores de umidade de 80%, 82%, 84%, 86%, 88% e 90%

<b>V = 10 m/s</b>		
$X'$	$T_{cr}$ (°C)	$t_r$ (s)
80%	-0,162	2350
82%	-0,161	2340
84%	-0,159	2270
86%	-0,158	2260
88%	-0,158	2300
90%	-0,156	2190

É possível observar que para a velocidade de 1 m/s,  $t_r$  foi diminuindo a medida que o teor de umidade aumenta, porém, essa diferença não chega a ser significativa, já que, a diferença entre o menor e o maior valor de  $t_r$  é de aproximadamente 7%. A mesma análise pode ser feita no que diz respeito as simulações com 5 m/s e 10 m/s, e o resultado alcançado é similar ao obtido para 1 m/s, assim, pode-se dizer que o teor de umidade não influencia de forma considerável na  $t_r$  de um produto submetido as mesmas condições de transferência de calor.

Quando comparado os resultados obtidos para um valor de teor de umidade fixa e a velocidade do ar sendo variada, verifica-se que quando se muda a velocidade de 1 m/s para 5 m/s, que implica na mudança do coeficiente de convecção de 15,467 W/ m<sup>2</sup> K para 37,562 W/ m<sup>2</sup> K, há uma diminuição significativa de  $t_r$ , que esta na ordem de 30% para todos os casos. Já quando se varia a velocidade de 5 m/s para 10 m/s, que implica na mudança do coeficiente de convecção de 37,562 W/ m<sup>2</sup> K para 55,679 W/ m<sup>2</sup> K, há uma diminuição discreta em  $t_r$ , numa média de aproximadamente 9% para todos os casos.

É possível também analisar a influência do teor de umidade e da velocidade do ar na taxa de variação a temperatura no tempo. As Figuras 4.37 a 4.42 mostram a taxa de variação da temperatura no tempo ao se fixar o teor de umidade e se modificar a velocidade do ar, é possível observar também o tempo onde ocorre o valor de mínimo da função para cada uma das curvas.

Observa-se que as curvas  $dT/dt$  quando  $V = 1$  m/s, apresentam um comportamento distinto das outras curvas, visto que, após o seu ponto de mínimo, há uma mudança brusca na sua inclinação, quando as curvas estão no intervalo entre 1500 e 2000 segundos, tal fenômeno pode ser explicado pelo fato do primeiro volume do sólido a alcançar  $T_{cr}$  ocorre num tempo posterior ao ponto de mínimo da função, tal afirmativa vai ser mais bem compreendida posteriormente, quando forem expostos os perfis de temperatura do sólido ao longo do tempo. Já para as curvas de  $dT/dt$  quando  $V = 5$  m/s e  $V = 10$  m/s, o comportamento descrito anteriormente não foi verificado, já que o primeiro volume do sólido a alcançar  $T_{cr}$  ocorreu num momento anterior ao ponto de mínimo da função.

Figura 4.37: Comparativo das curvas  $dT/dt$  para o teor de umidade de 80% e velocidade do ar variando em 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s. Fonte: Autoria Própria.

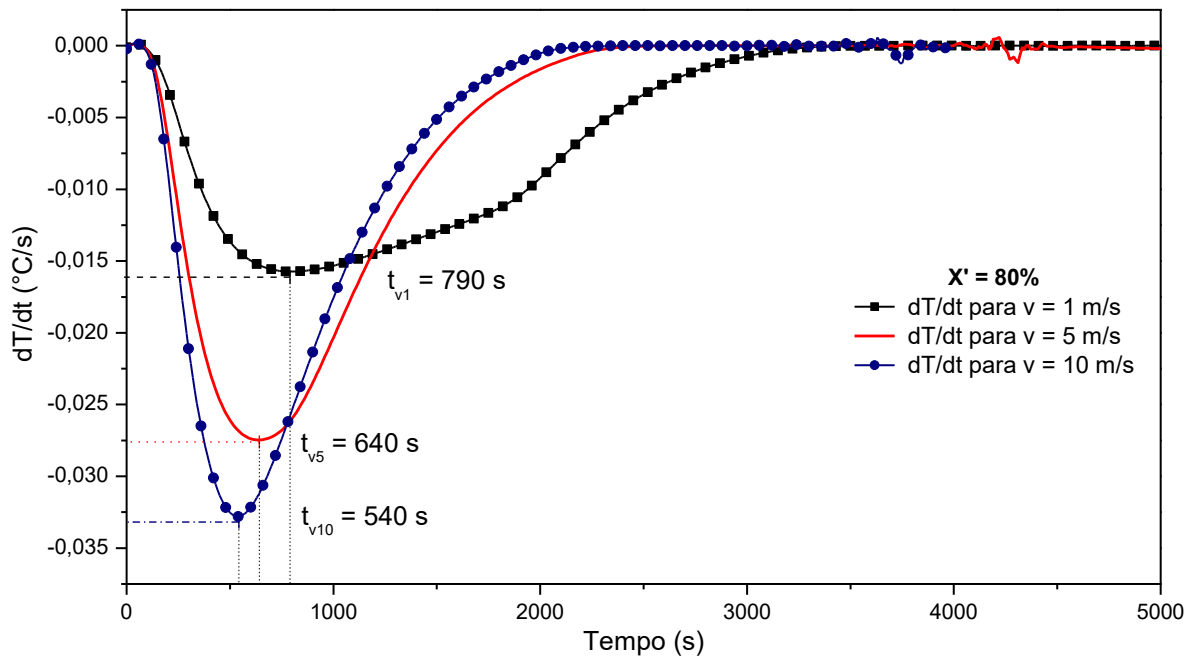


Figura 4.38: Comparativo das curvas  $dT/dt$  para o teor de umidade de 82% e velocidade do ar variando em 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s. Fonte: Autoria Própria.

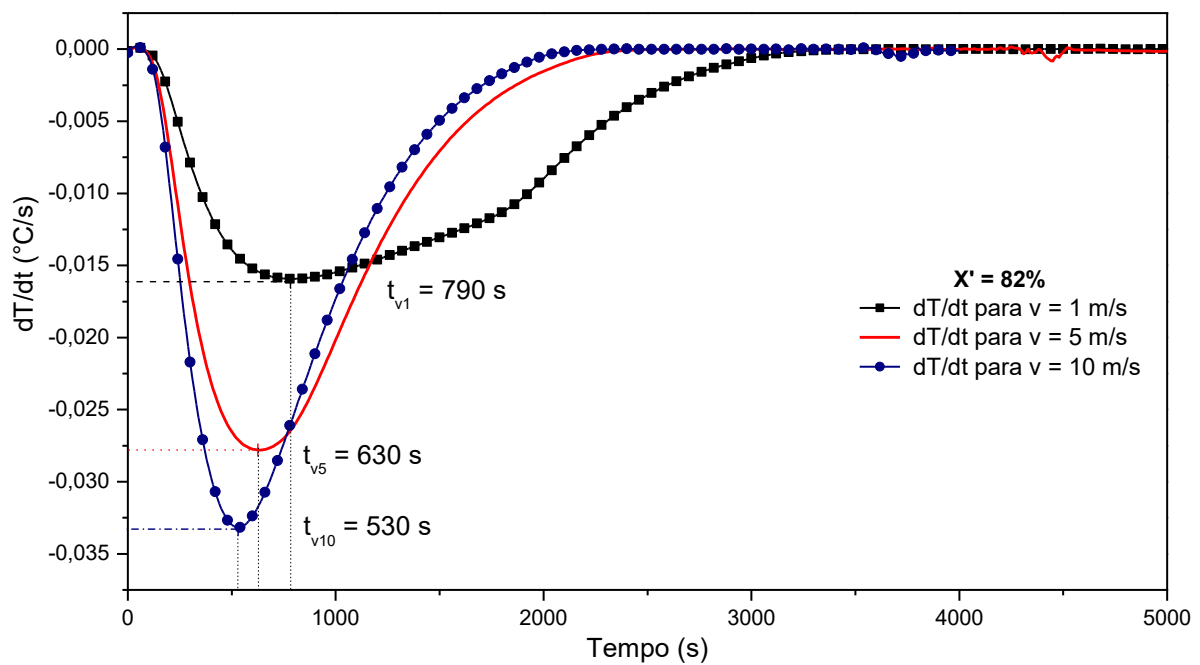


Figura 4.39: Comparativo das curvas  $dT/dt$  para o teor de umidade de 84% e velocidade do ar variando em 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s. Fonte: Autoria Própria.

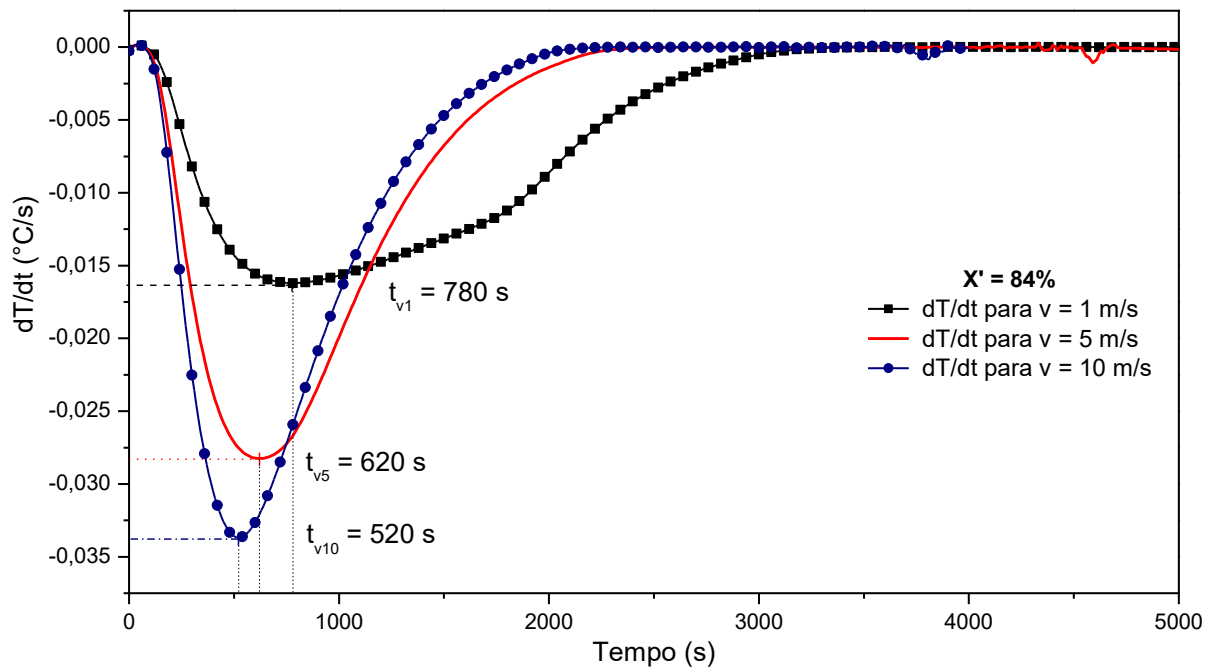


Figura 4.40: Comparativo das curvas  $dT/dt$  para o teor de umidade de 86% e velocidade do ar variando em 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s. Fonte: Autoria Própria.

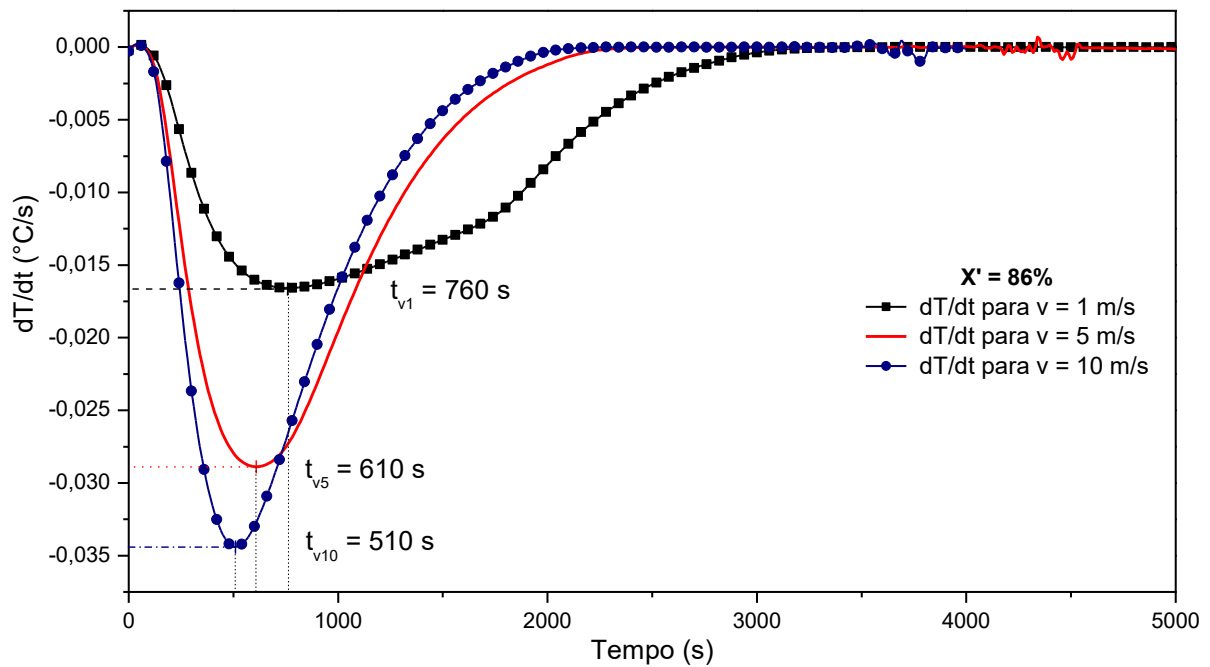




Figura 4.41: Comparativo das curvas  $dT/dt$  para o teor de umidade de 88% e velocidade do ar variando em 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s. Fonte: Autoria Própria.

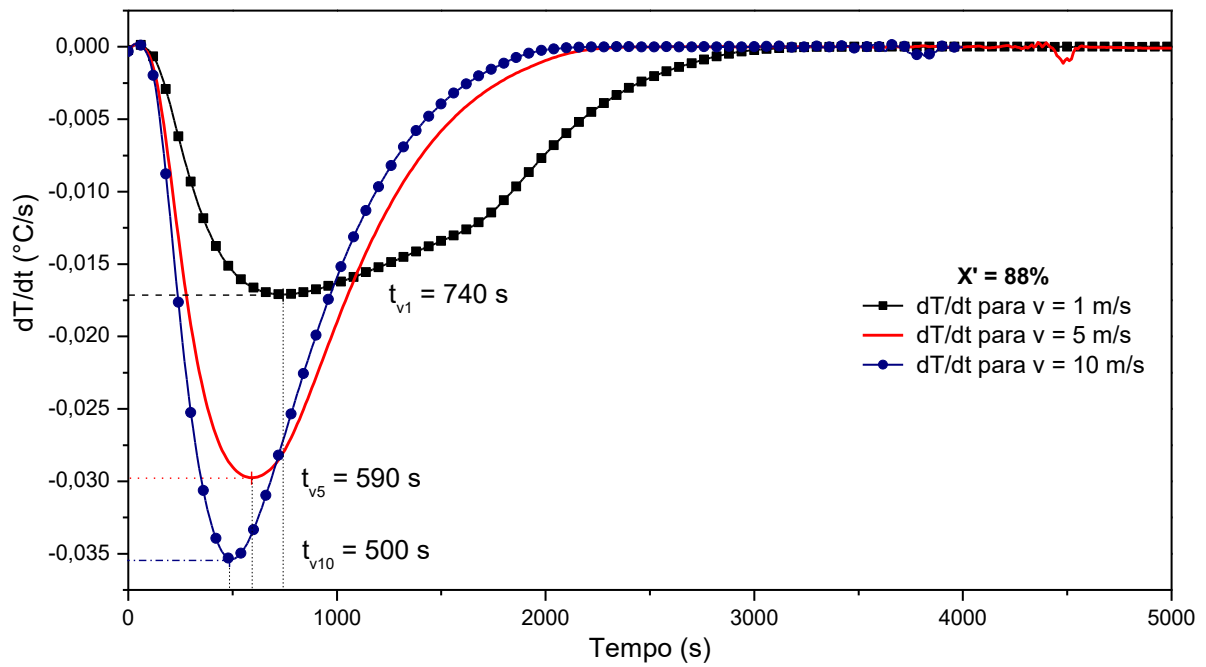
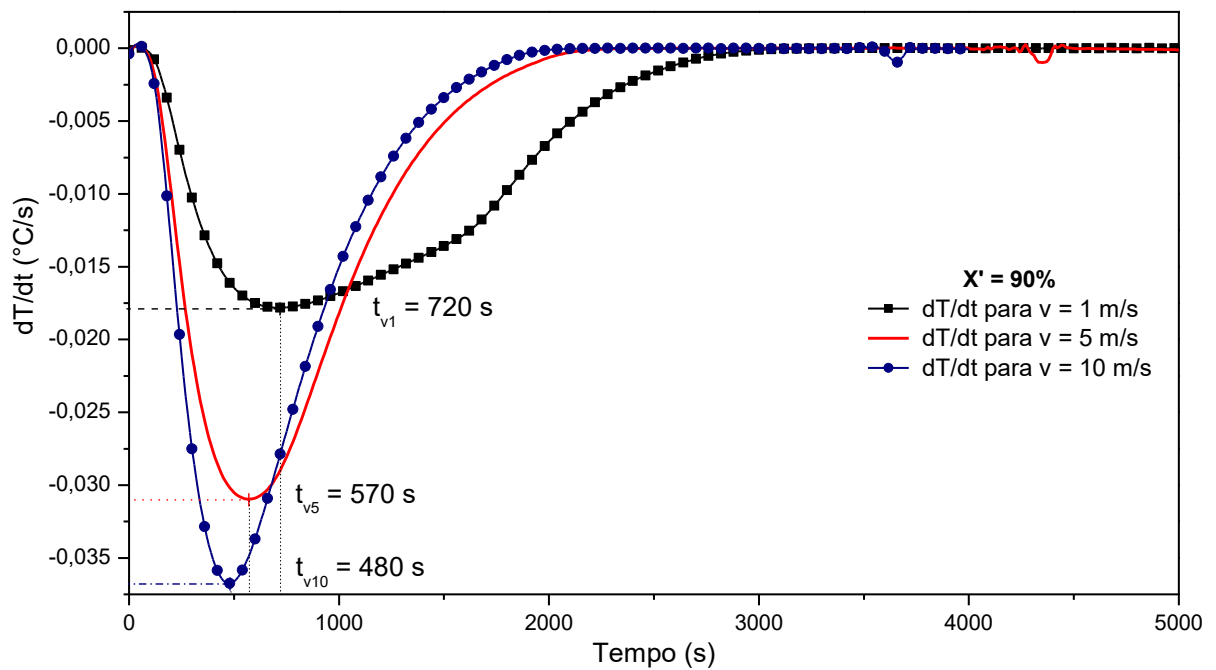


Figura 4.42: Comparativo das curvas  $dT/dt$  para o teor de umidade de 90% e velocidade do ar variando em 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s. Fonte: Autoria Própria.



Outro fato interessante é que, ao se fixar o teor de umidade e variar a velocidade do ar, todas as curvas apresentaram um aumento proporcional nos valores mínimos de  $dT/dt$ , isto é, tomando como referência o valor de mínimo obtidos nas curvas para  $V = 1$  m/s, houve um aumento de aproximadamente 73% e 107% ao valor de mínimo das curvas para  $V = 5$  m/s e  $V = 10$  m/s, respectivamente, tais proporções se mantiveram para todos os teores de umidade. Observa-se também que, ao se fixar a velocidade do ar e variar o teor de umidade, verificou-se que o aumento do teor de umidade, proporciona um aumento no valor de mínimo da curva e a diminuição do tempo para sua ocorrência.

Do mesmo modo como ocorreu na simulação para a convecção natural, na convecção forçada foram desenvolvidos planos para visualizar os gradientes de temperatura no sólido ao longo do tempo, os planos 1, 2, 3 e 4 foram novamente utilizados para essa avaliação. A análise temporal foi realizada para um período total de 4000 s, assim, foram selecionados os instantes  $t_1 = 500$  s,  $t_2 = 1000$  s,  $t_3 = 1500$  s,  $t_4 = 2000$  s,  $t_5 = 3000$  s e  $t_6 = 4000$  s para mostrar os gradientes de temperatura no sólido ao longo do tempo, tal procedimento foi utilizado para todos os teores de umidade e velocidade do ar analisados. Contudo, devido a grande quantidade de figuras geradas, serão apresentados apenas os perfis de temperatura das amostras com teor de umidade de 80% e 90%, ao explorar esses dois perfis, é possível estimar o comportamento das outras amostras, visto que estas apresentam características similares. Assim, da Figura 4.43 a 4.54 exibem-se os perfis de temperatura ao longo do tempo das amostras cuja teores de umidade são de 80% e 90% e velocidade do ar de 1 m/s.

Figura 4.43: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_1 = 500s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 1$  m/s. Fonte: Autoria própria.

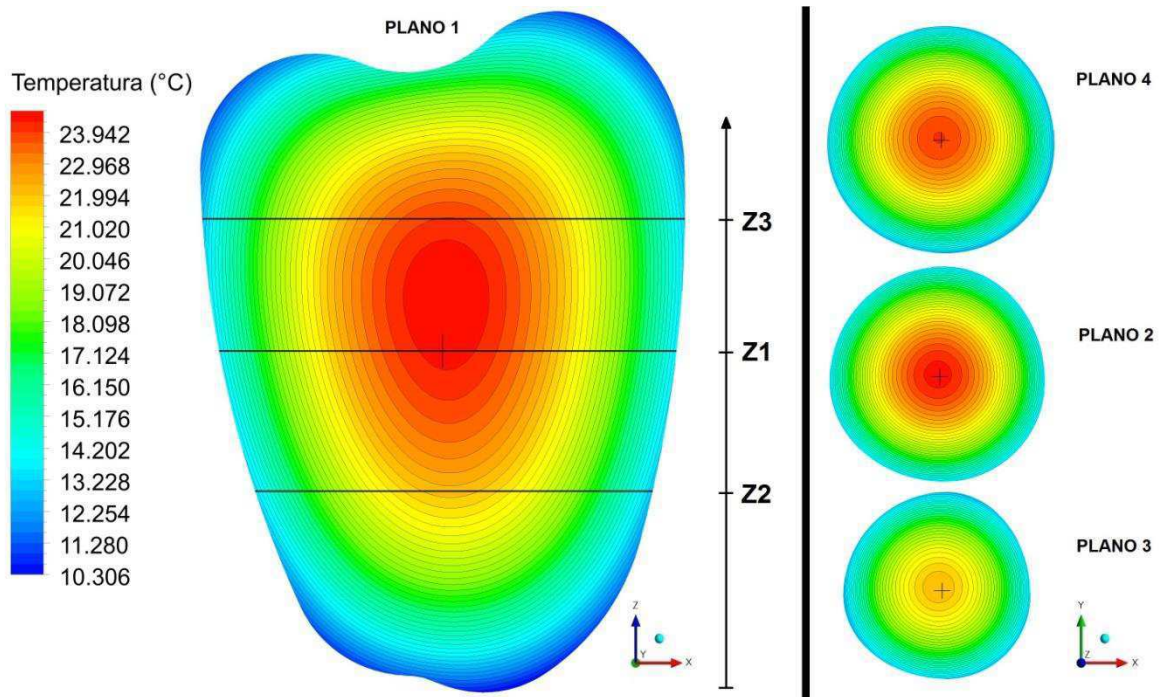


Figura 4.44: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_1 = 500s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 1$  m/s. Fonte: Autoria própria.

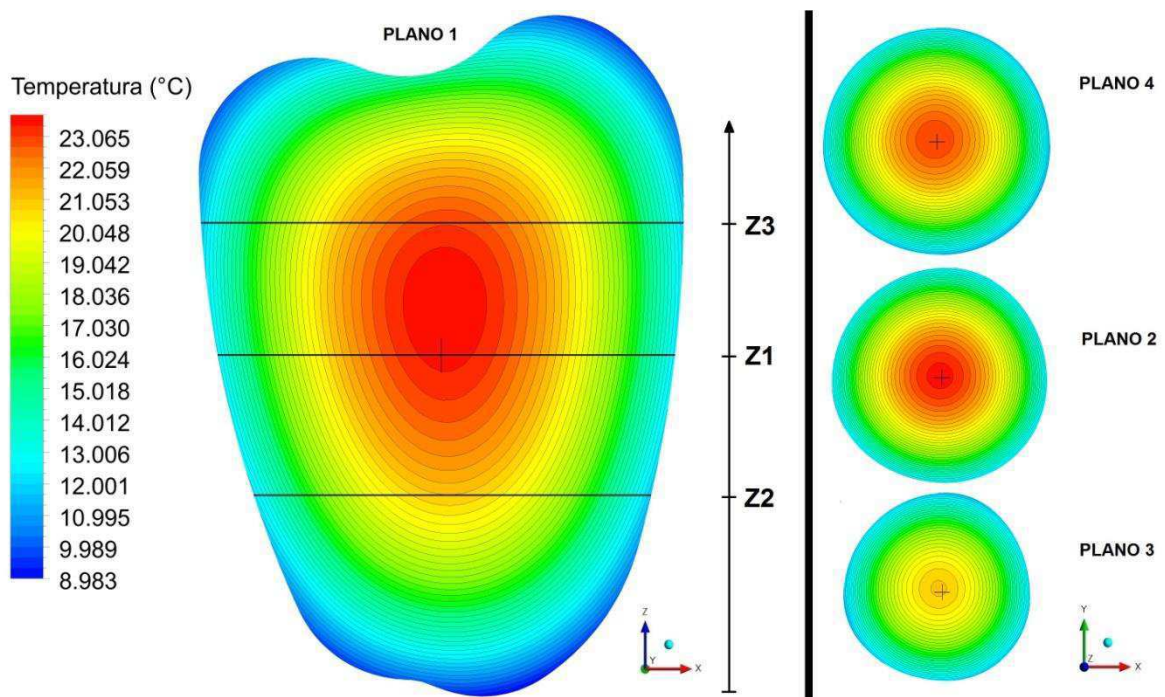


Figura 4.45: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_2 = 1000s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 1$  m/s. Fonte: Autoria própria.

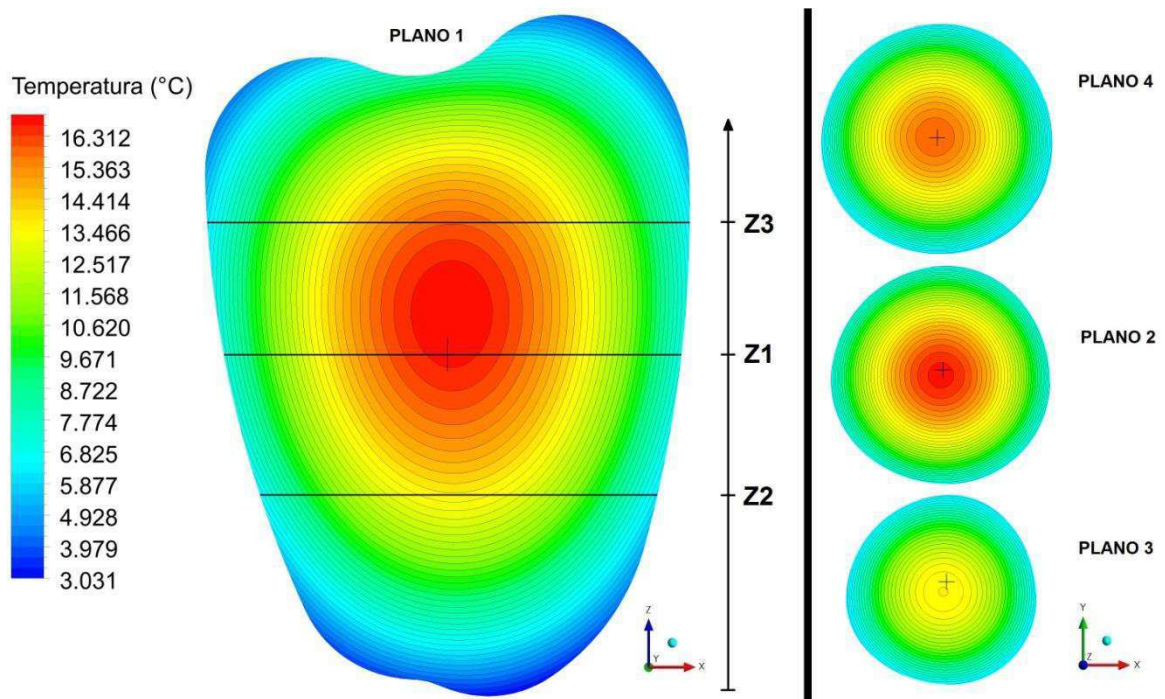


Figura 4.46: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_2 = 1000s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 1$  m/s. Fonte: Autoria própria.

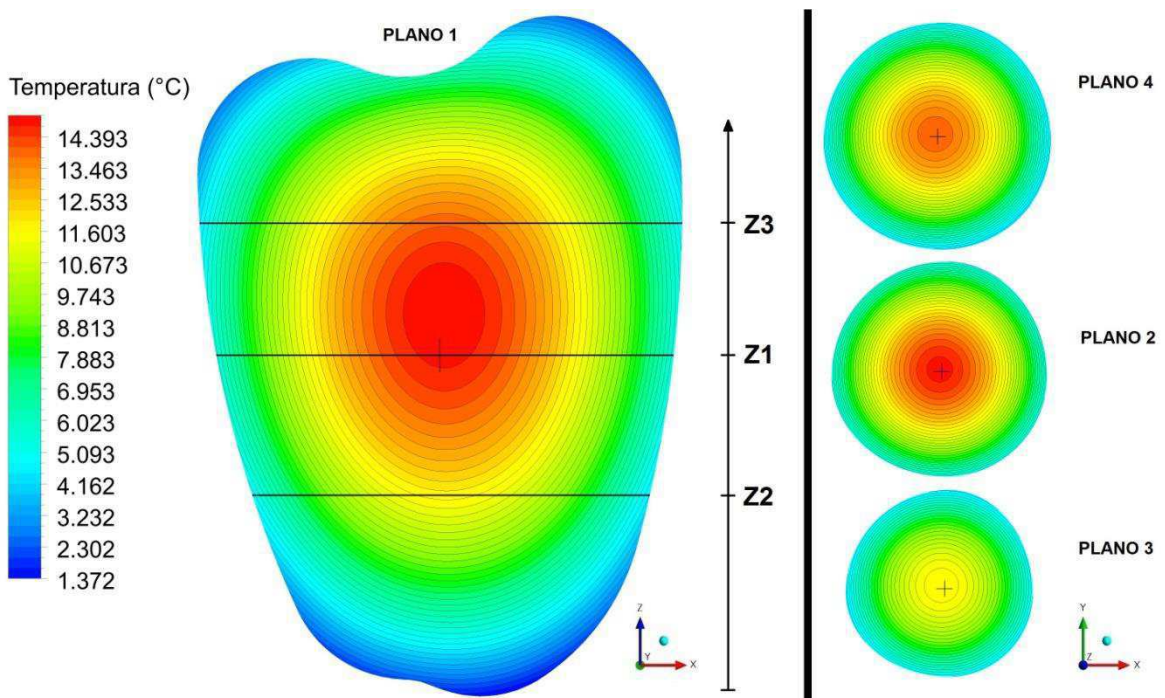


Figura 4.47: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_3 = 1500s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 1$  m/s. Fonte: Autoria própria.

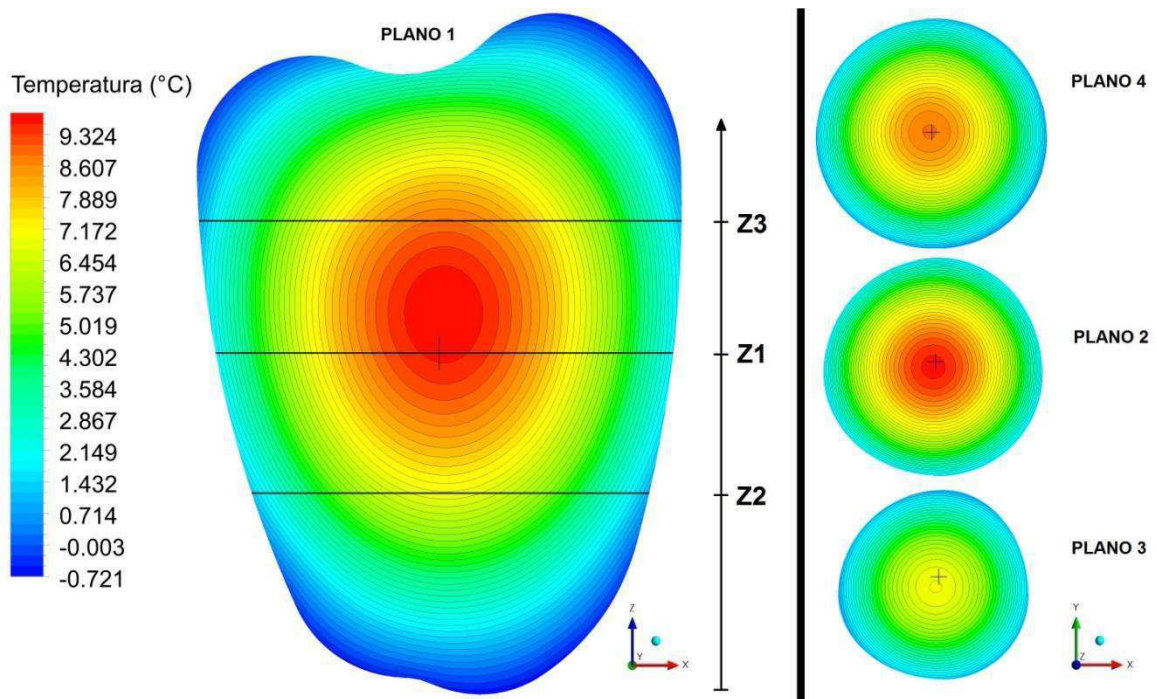


Figura 4.48: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_3 = 1500s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 1$  m/s. Fonte: Autoria própria.

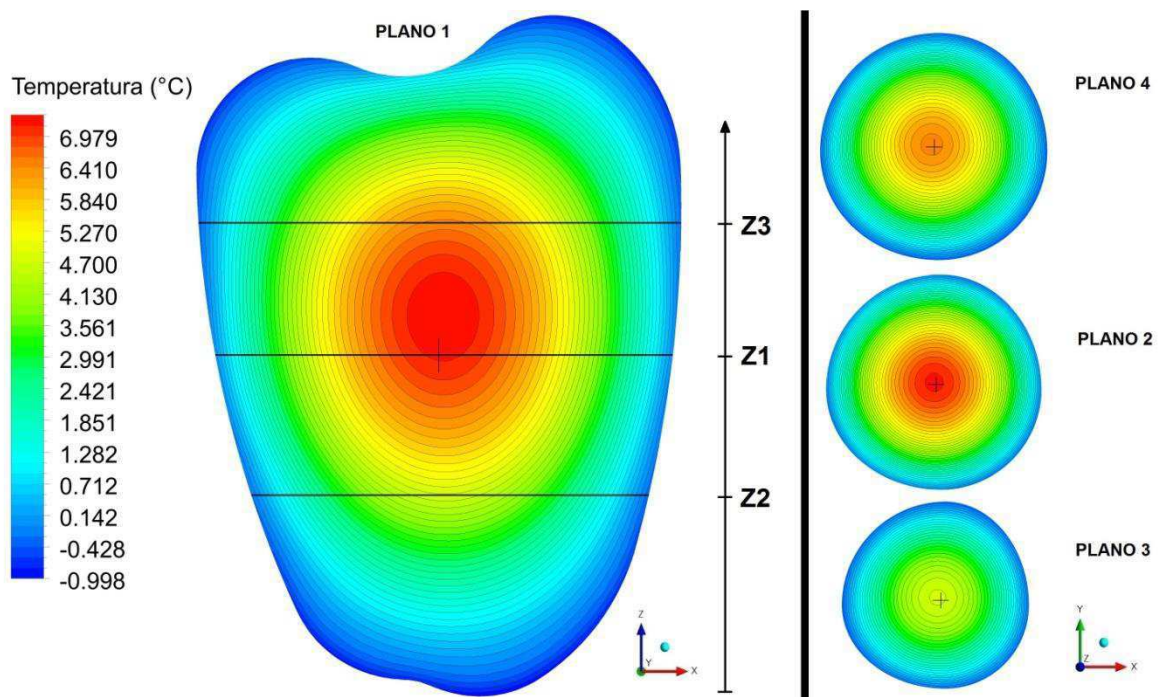


Figura 4.49: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_4 = 2000s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 1$  m/s. Fonte: Autoria própria.

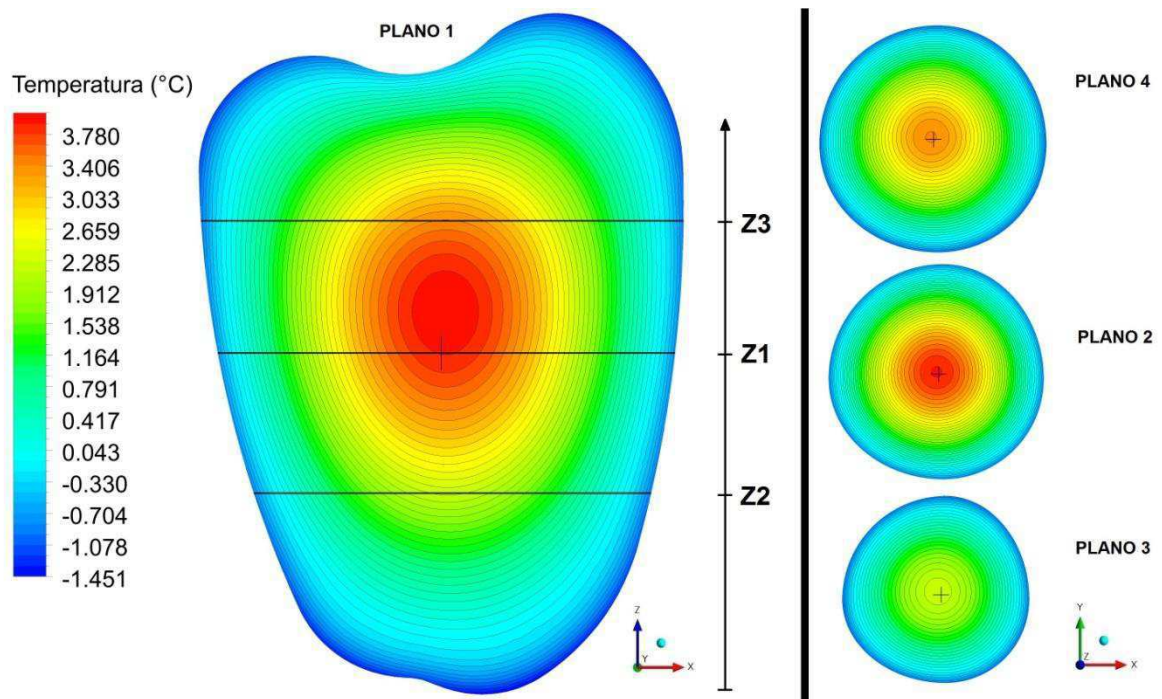


Figura 4.50: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_4 = 2000s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 1$  m/s. Fonte: Autoria própria.

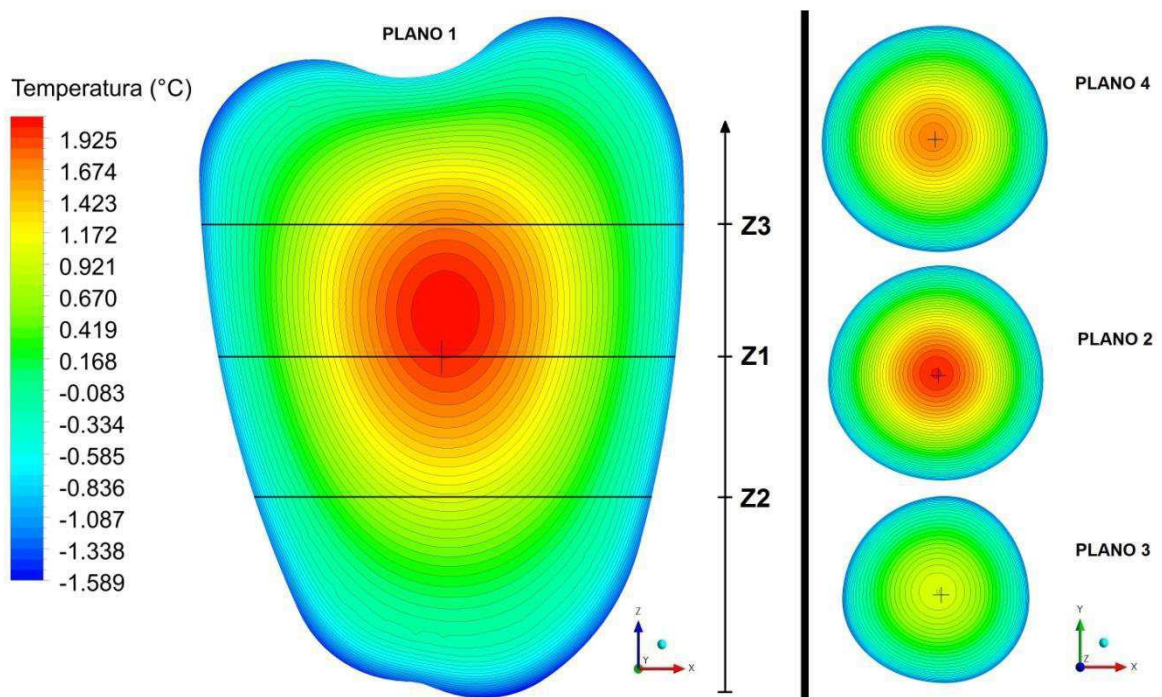


Figura 4.51: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_5 = 3000s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 1$  m/s. Fonte: Autoria própria.

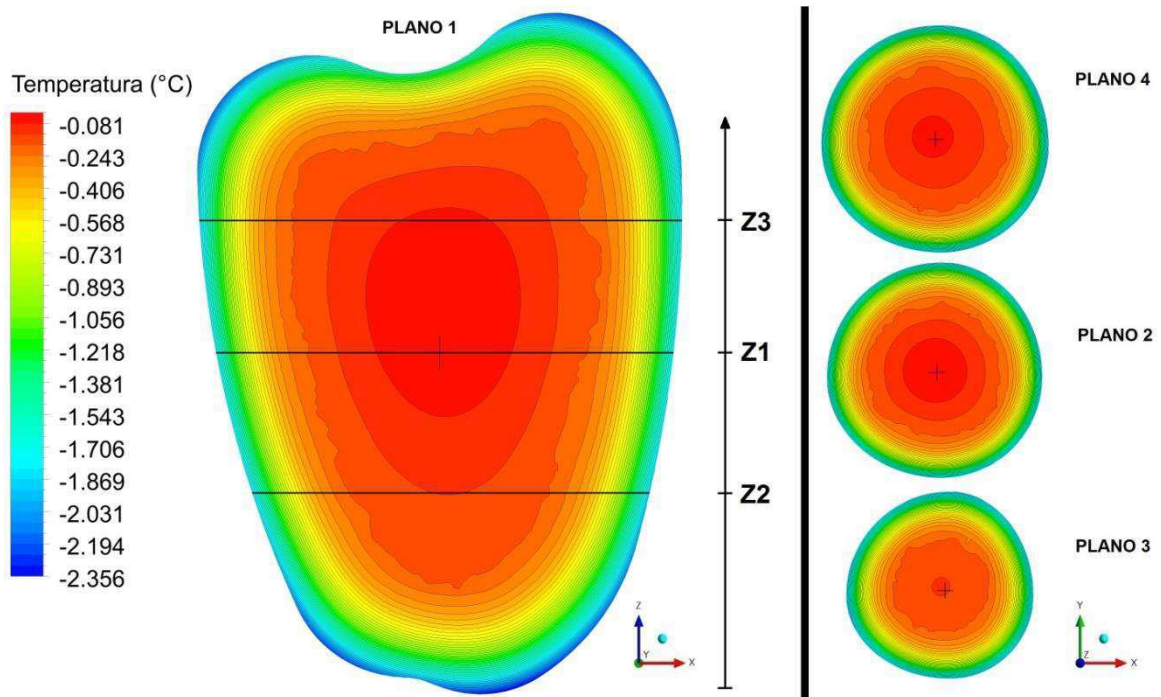


Figura 4.52: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_5 = 3000s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 1$  m/s. Fonte: Autoria própria.

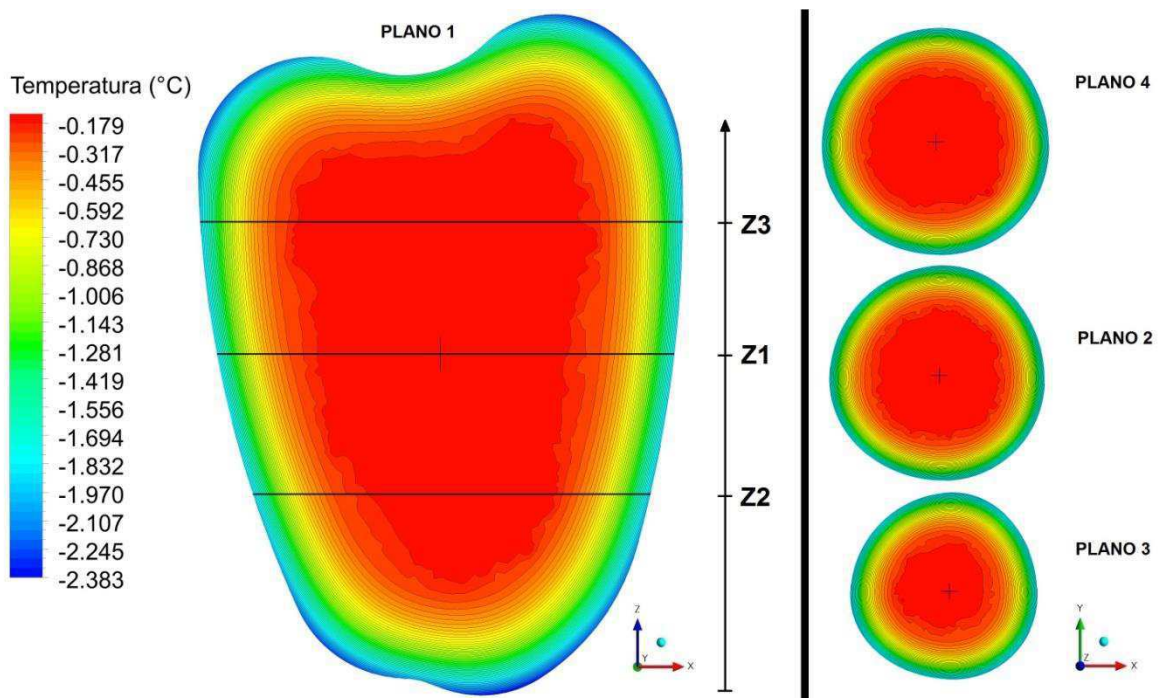


Figura 4.53: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_6 = 4000s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 1$  m/s. Fonte: Autoria própria.

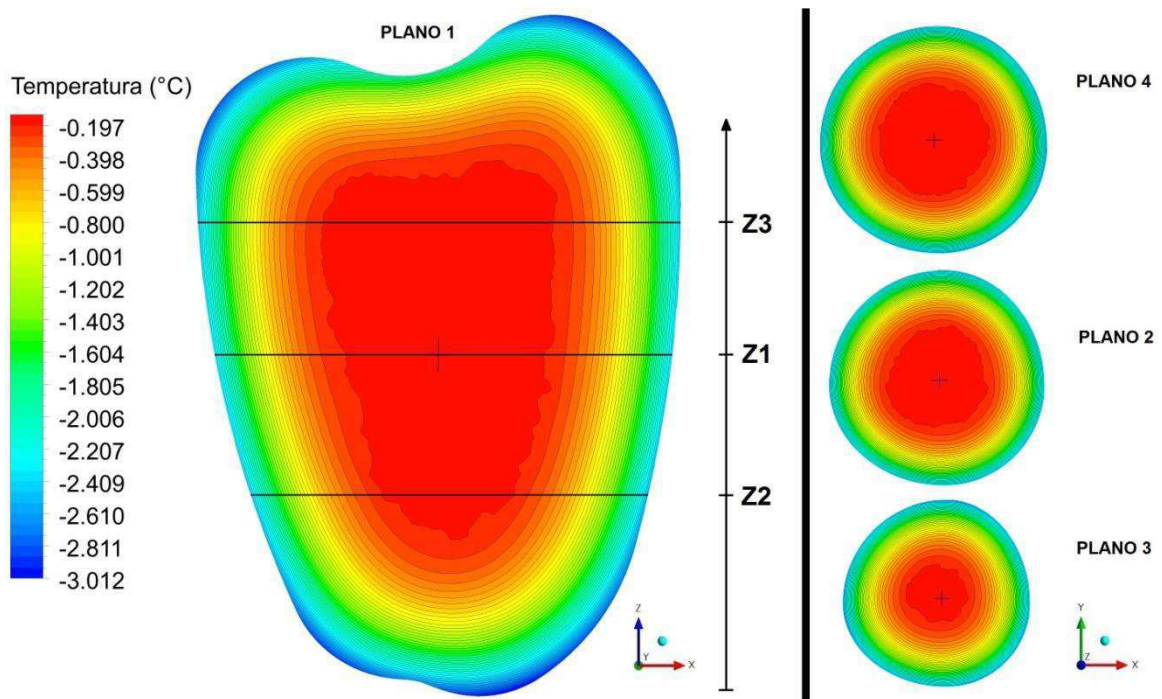
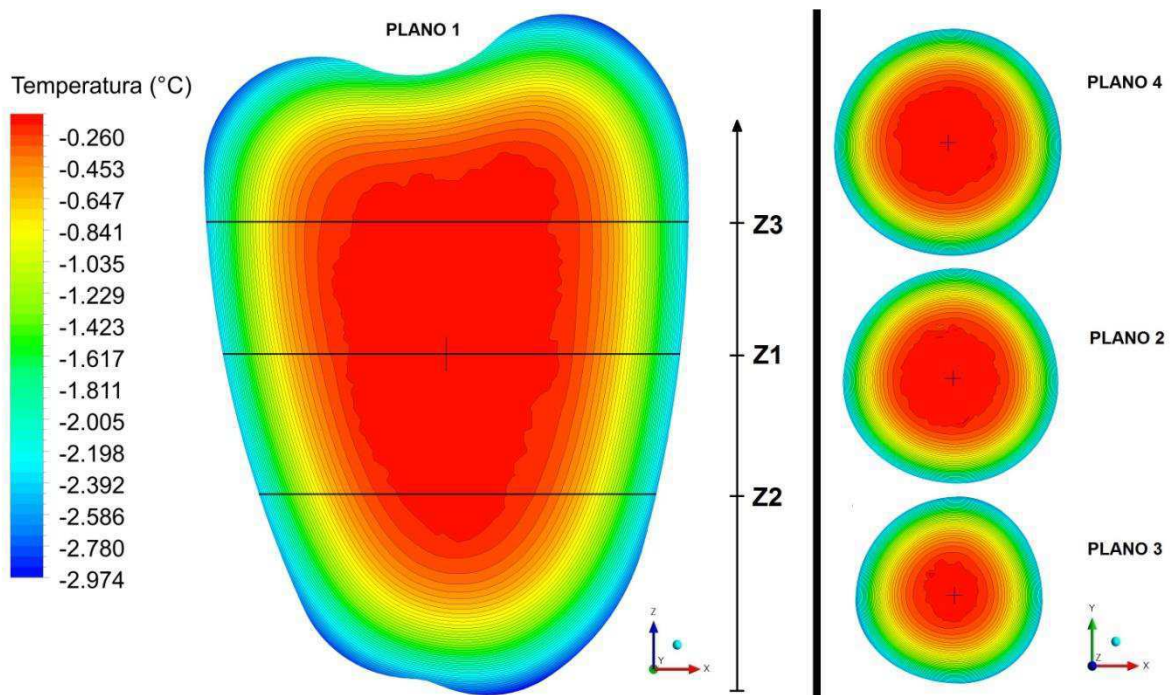


Figura 4.54: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_6 = 4000s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 1$  m/s. Fonte: Autoria própria.





Das Figuras 4.43 e 4.44, observa-se que há um grande gradiente de temperatura, sendo as regiões extremas onde existe uma curvatura acentuada no sólido, as mais frias e a região central mais quente, contudo, para o sólido com  $X' = 90\%$ , essas temperaturas foram inferiores ao do sólido com  $X' = 80\%$ , em razão de  $dT/dt$  apresentar um valor superior para  $X' = 90\%$  do que para  $X' = 80\%$ . Observa-se que entre os tempos de 1000 e 1500 segundos, o sólido atinge a  $T_{cr}$ , atestando assim a afirmativa de que o primeiro volume do sólido alcança  $T_{cr}$  num tempo posterior ao ponto de mínimo da função. Das Figuras 4.49 a 4.54 é possível observar que a região central do sólido da amostra com  $X' = 90\%$  consegue ser resfriada mais rapidamente que a amostra com  $X' = 80\%$ , enquanto que a superfície do sólido com  $X' = 80\%$  consegue ser resfriada mais rapidamente que a amostra com  $X' = 90\%$ .

Da Figura 4.55 a 4.66, mostra-se os perfis de temperatura ao longo do tempo das amostras cuja teores de umidade são de 80% e 90% e velocidade do ar de 5 m/s.

Figura 4.55: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_1 = 500s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 5$  m/s. Fonte: Autoria própria.

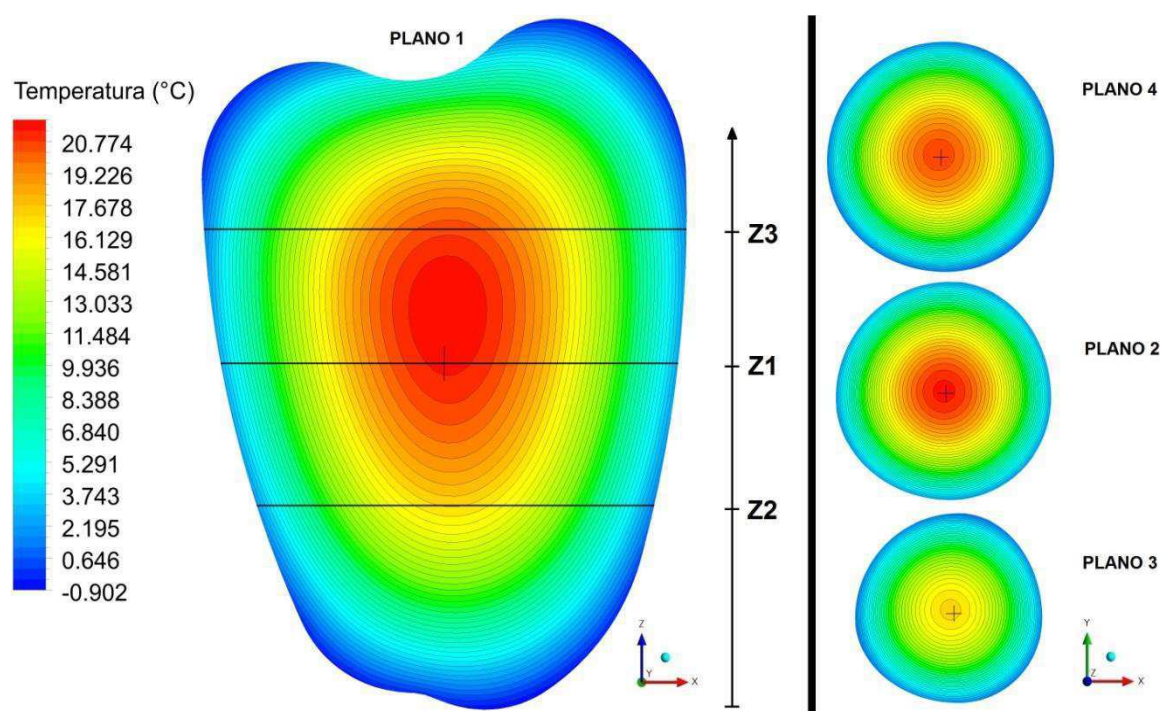


Figura 4.56: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_1 = 500s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 5$  m/s. Fonte: Autoria própria.

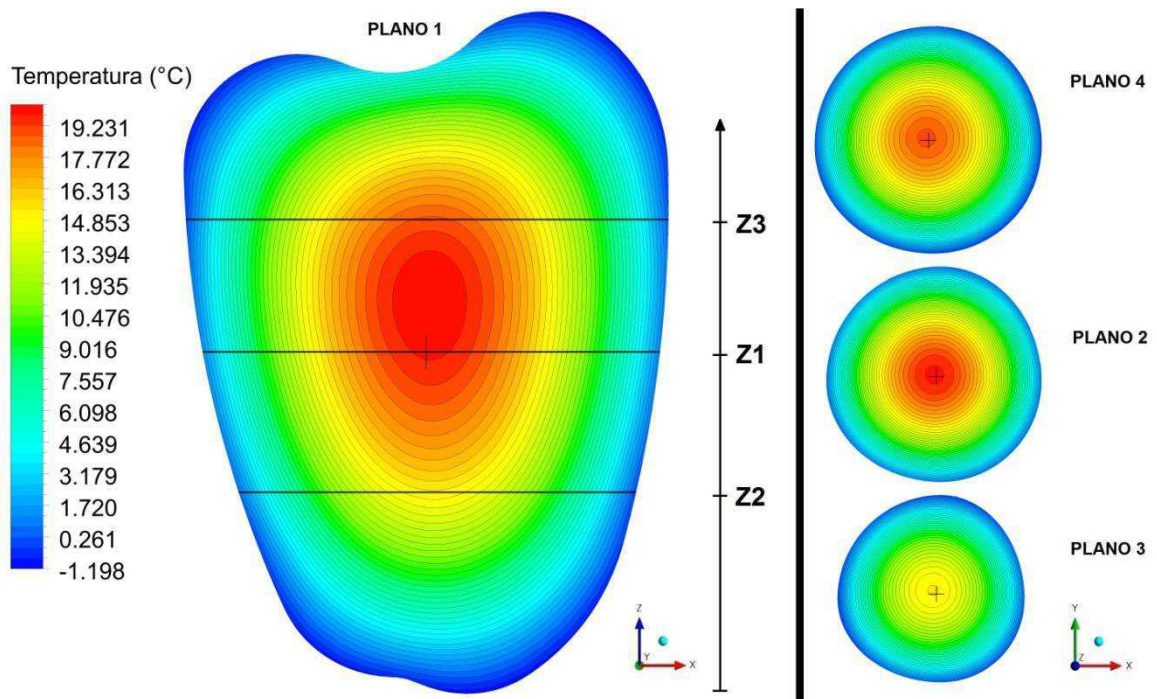


Figura 4.57: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_2 = 1000s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 5$  m/s. Fonte: Autoria própria.

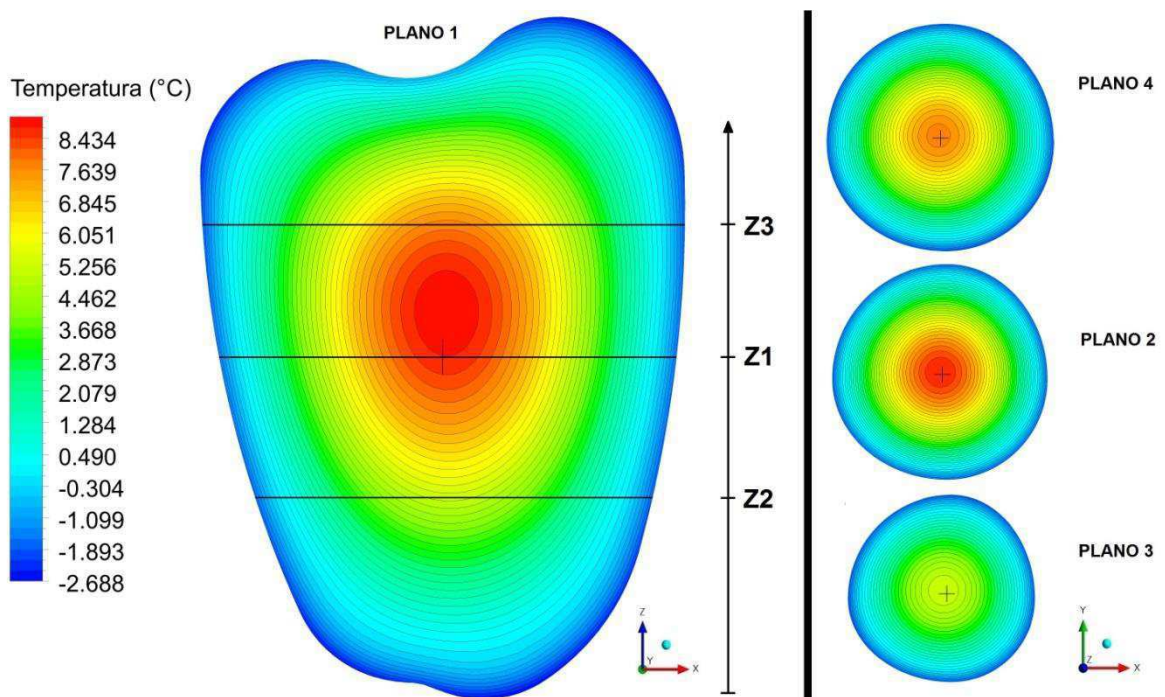


Figura 4.58: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_2 = 1000s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 5$  m/s. Fonte: Autoria própria.

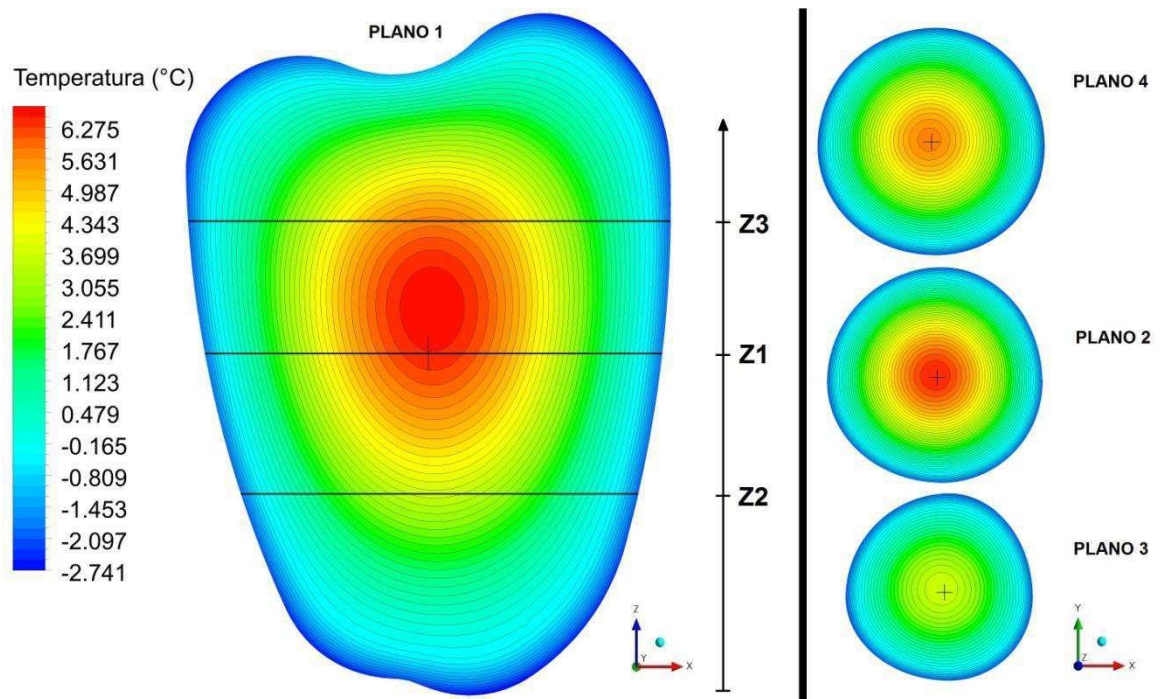


Figura 4.59: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_3 = 1500s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 5$  m/s. Fonte: Autoria própria.

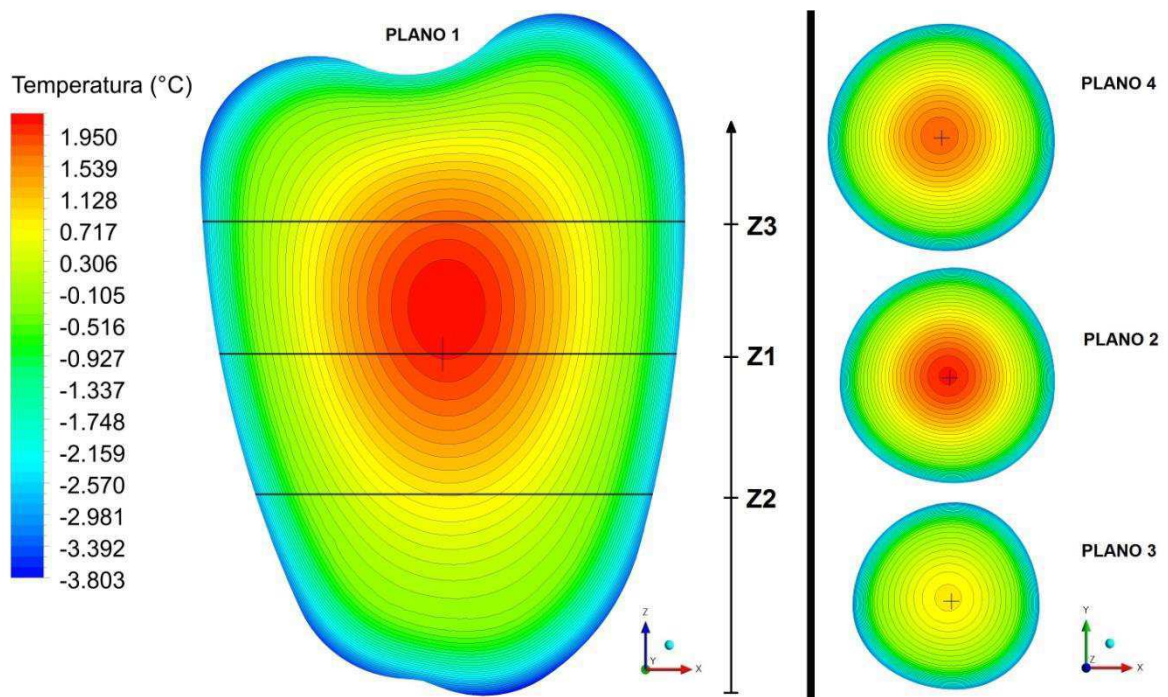


Figura 4.60: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_3 = 1500s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 5$  m/s. Fonte: Autoria própria.

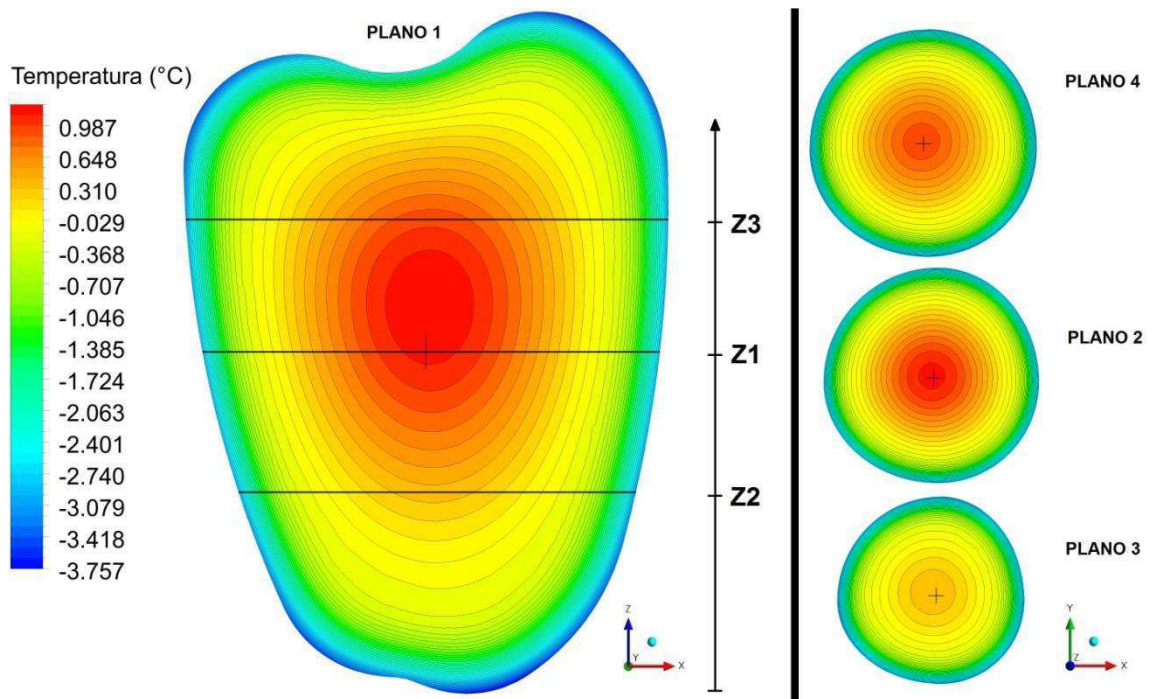


Figura 4.61: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_4 = 2000s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 5$  m/s. Fonte: Autoria própria.

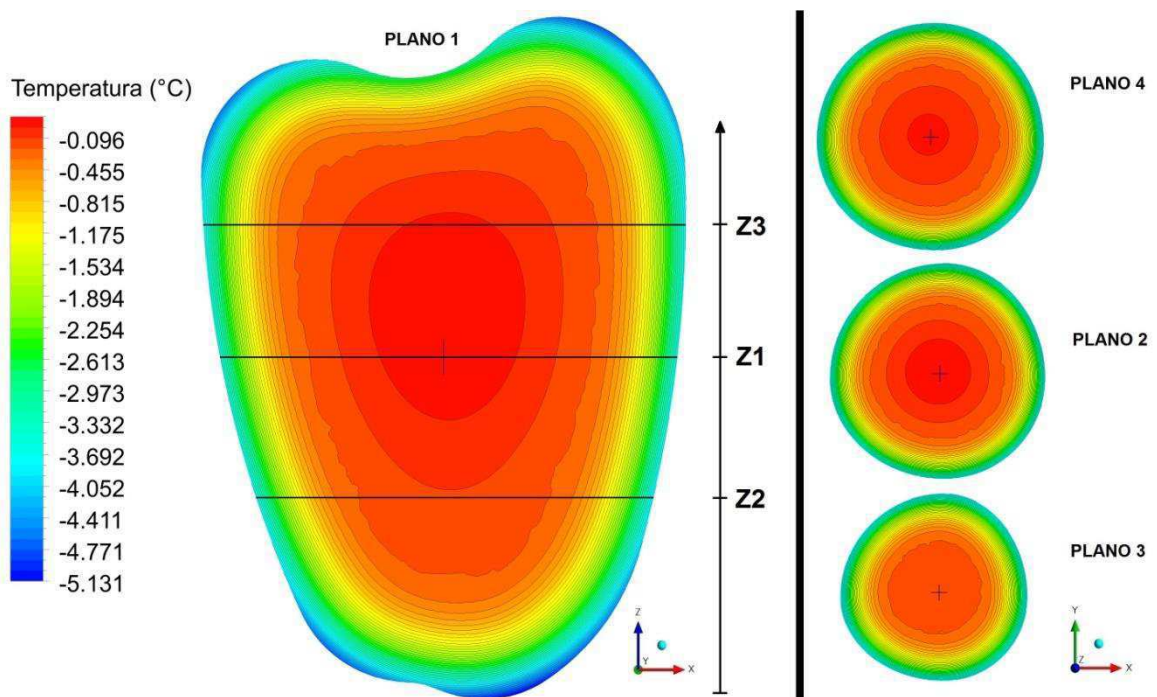


Figura 4.62: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_4 = 2000s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 5$  m/s. Fonte: Autoria própria.

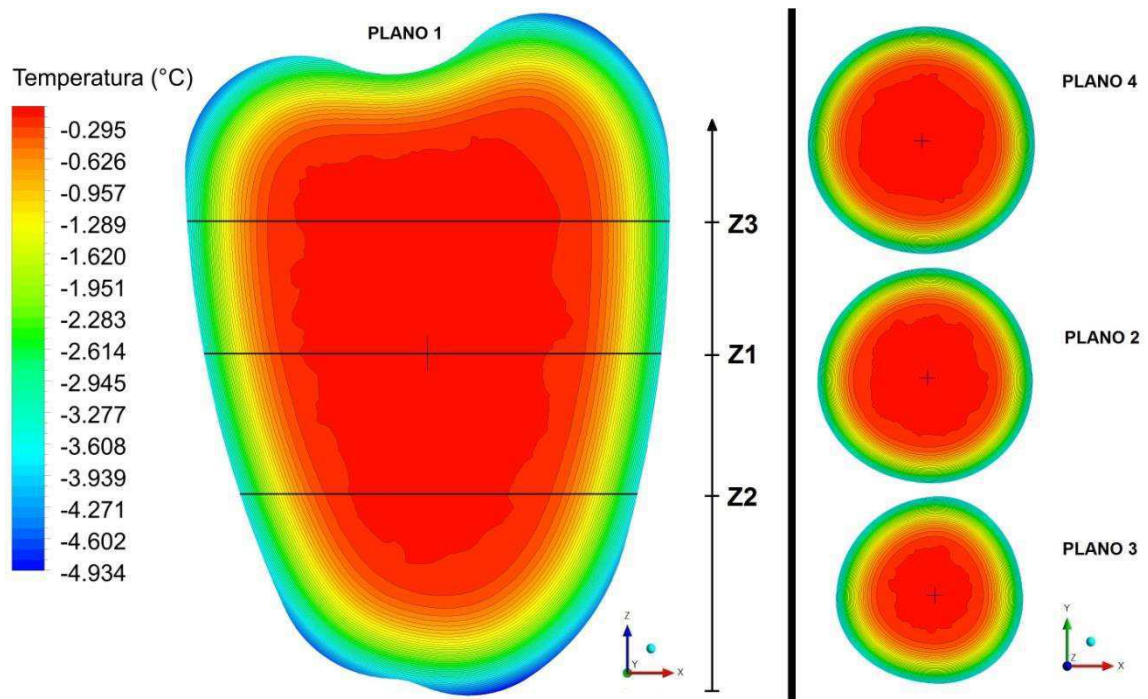


Figura 4.63: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_5 = 3000s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 5$  m/s. Fonte: Autoria própria.

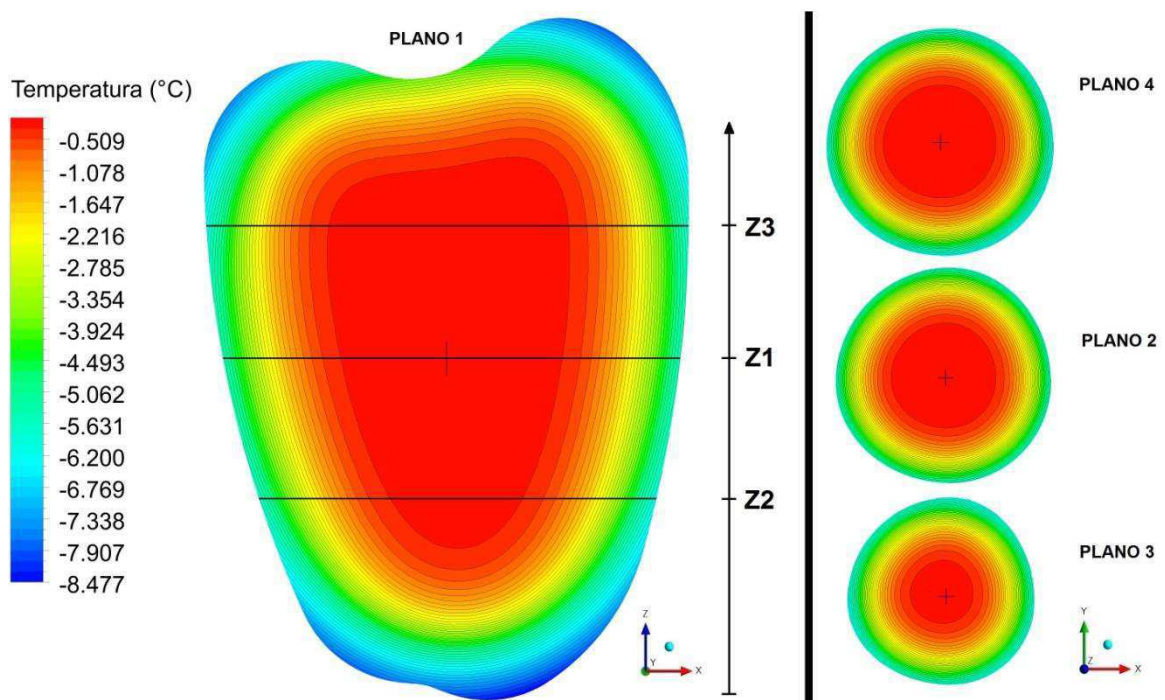


Figura 4.64: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_5 = 3000s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 5$  m/s. Fonte: Autoria própria.

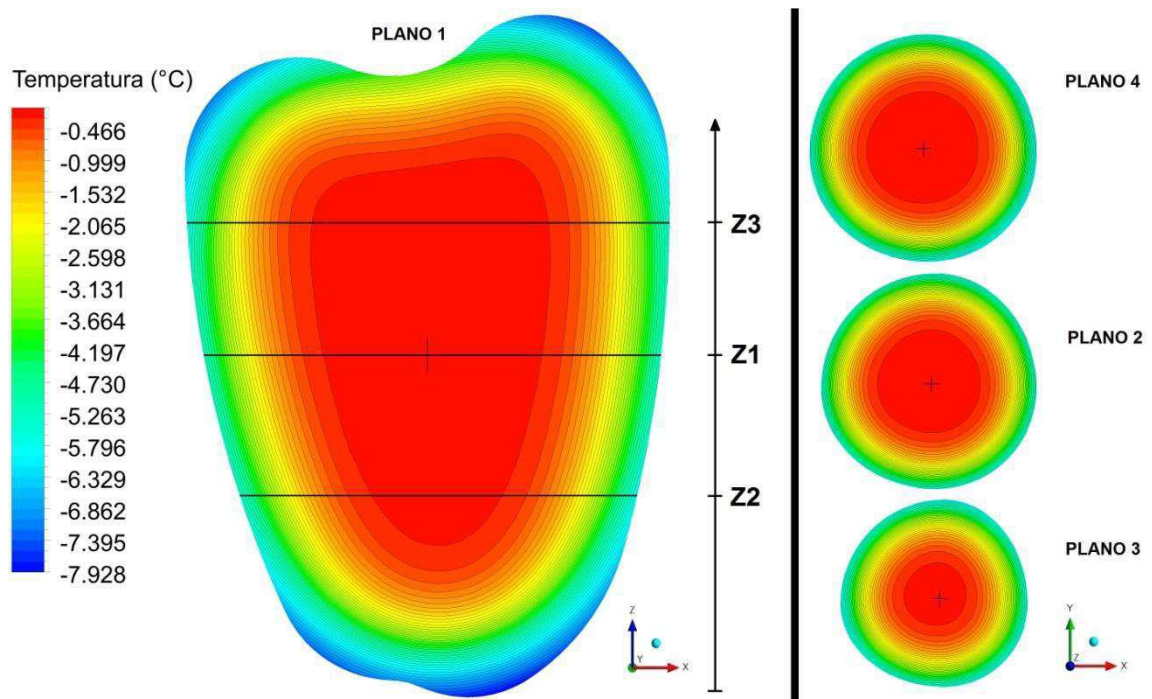


Figura 4.65: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_6 = 4000s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 5$  m/s. Fonte: Autoria própria.

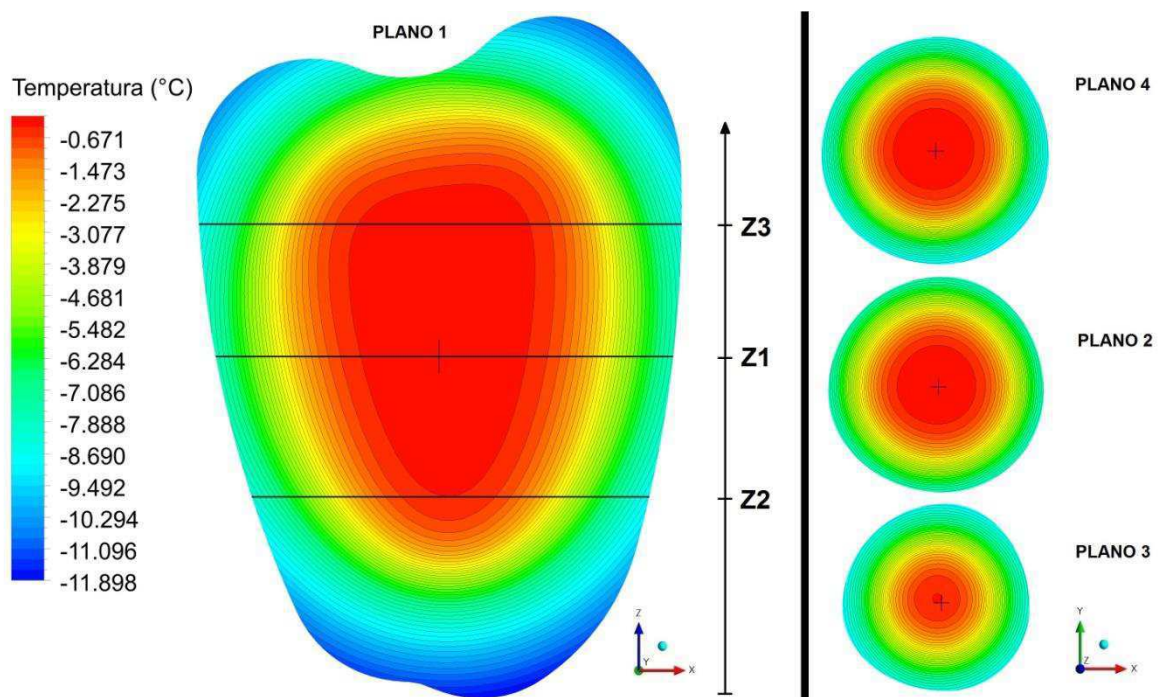
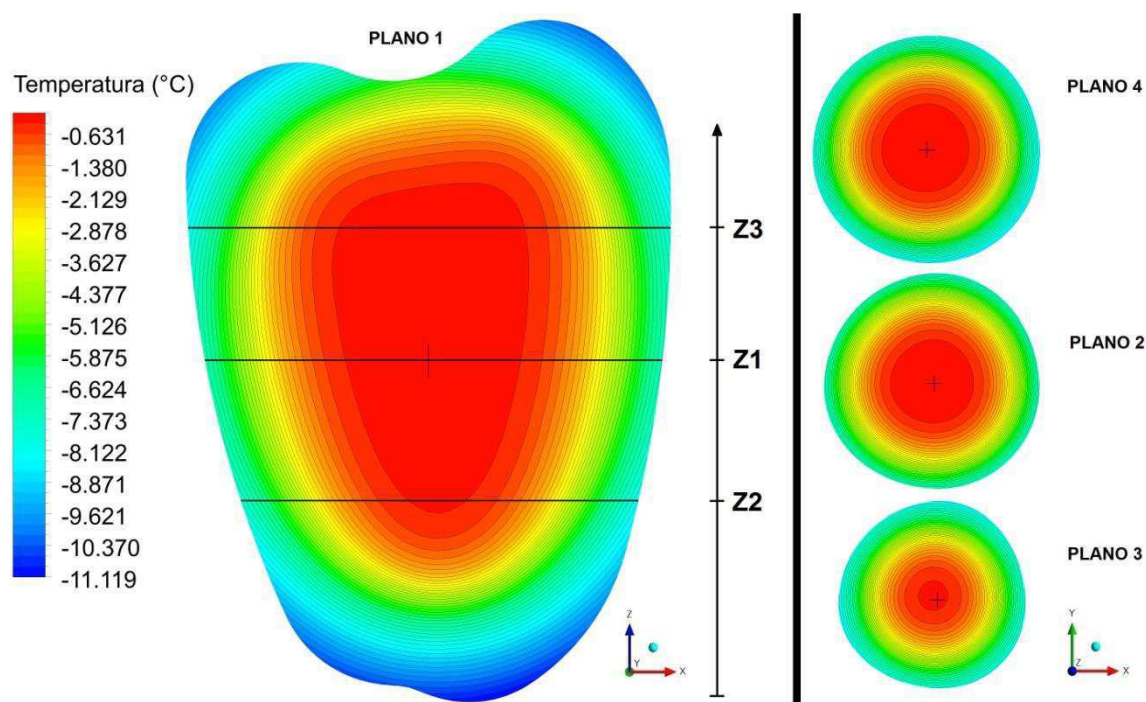


Figura 4.66: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_6 = 4000s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 5$  m/s. Fonte: Autoria própria.



Das Figuras 4.55 e 4.56, observa-se que há um grande gradiente de temperatura, sendo as regiões extremas onde existe uma curvatura acentuada no sólido as mais frias e a região central mais quente, contudo, para o sólido com  $X' = 90\%$ , essas temperaturas foram inferior ao do sólido com  $X' = 80\%$ , em razão de  $dT/dt$  apresentar um valor superior para  $X' = 90\%$  do que para  $X' = 80\%$ , outro fato importante a ser notável, é que o processo de mudança de fase no sólido foi iniciado num intervalo de tempo inferior a 500 segundos, assim, tanto o início da mudança de fase quanto o período onde  $dT/dt$  apresenta seu valor mínimo, encontram-se num intervalo de tempo próximos. Das Figuras 4.57 a 4.66 é possível observar que a região central do sólido da amostra com  $X' = 90\%$  consegue ser resfriada mais rapidamente que a amostra com  $X' = 80\%$ , enquanto que a superfície do sólido com  $X' = 80\%$  consegue ser resfriada mais rapidamente que a amostra com  $X' = 90\%$ .

Das Figuras 4.67 a 4.78, ilustra-se os perfis de temperatura ao longo do tempo das amostras cuja teores de umidade são de 80% e 90% e velocidade do ar de 10 m/s

Figura 4.67: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_1 = 500s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 10$  m/s. Fonte: Autoria própria.

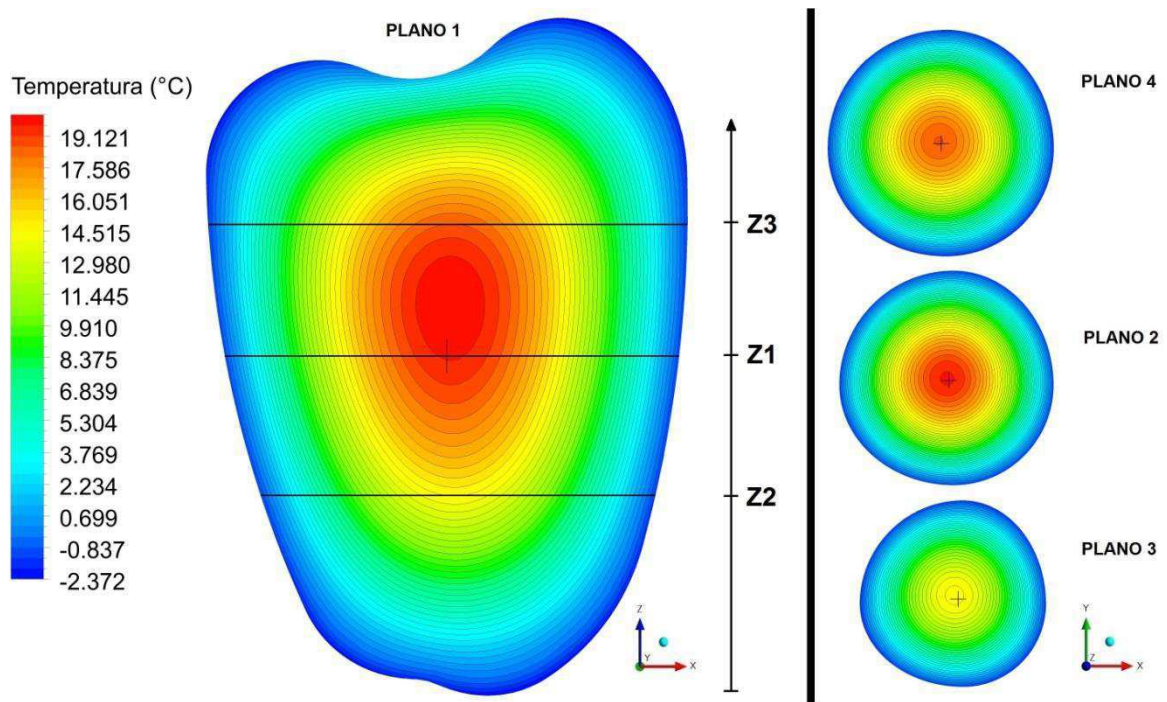


Figura 4.68: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_1 = 500s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 10$  m/s. Fonte: Autoria própria.

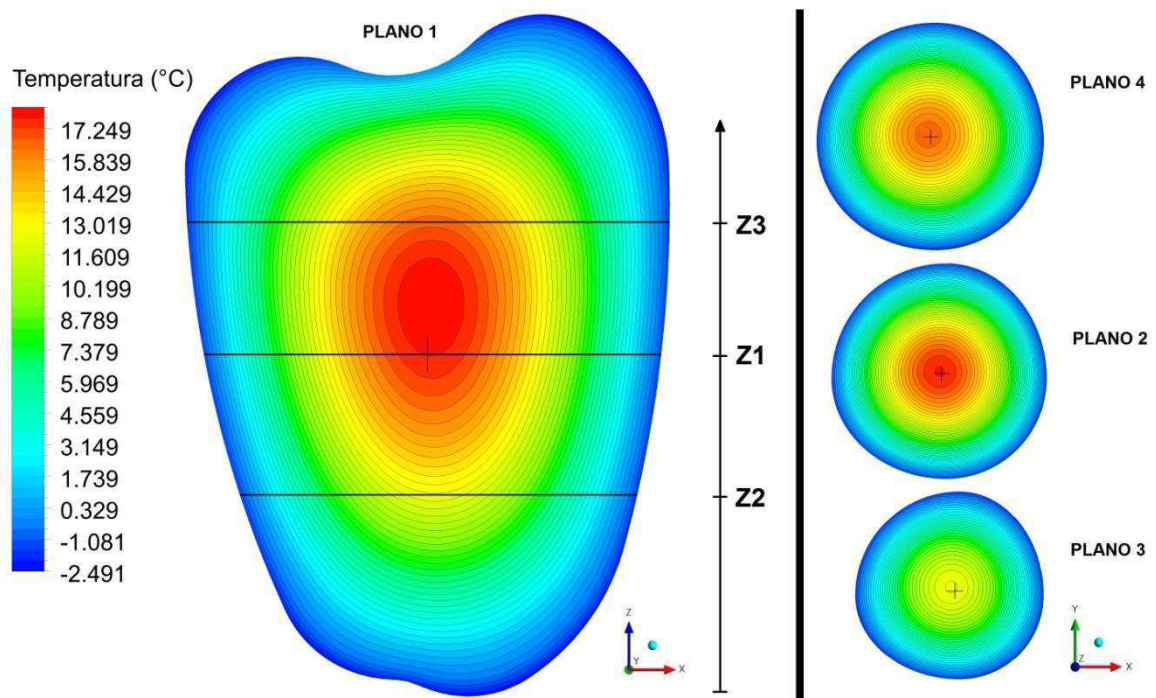




Figura 4.69: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_2 = 1000s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 10$  m/s. Fonte: Autoria própria.

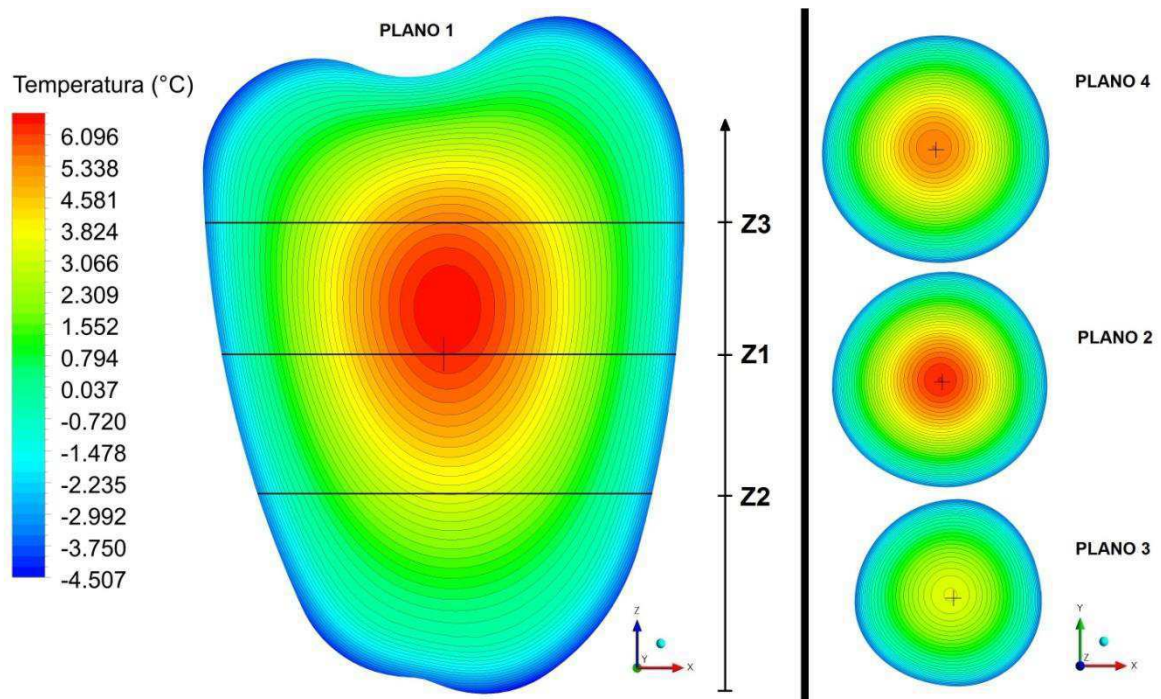


Figura 4.70: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_2 = 1000s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 10$  m/s. Fonte: Autoria própria.

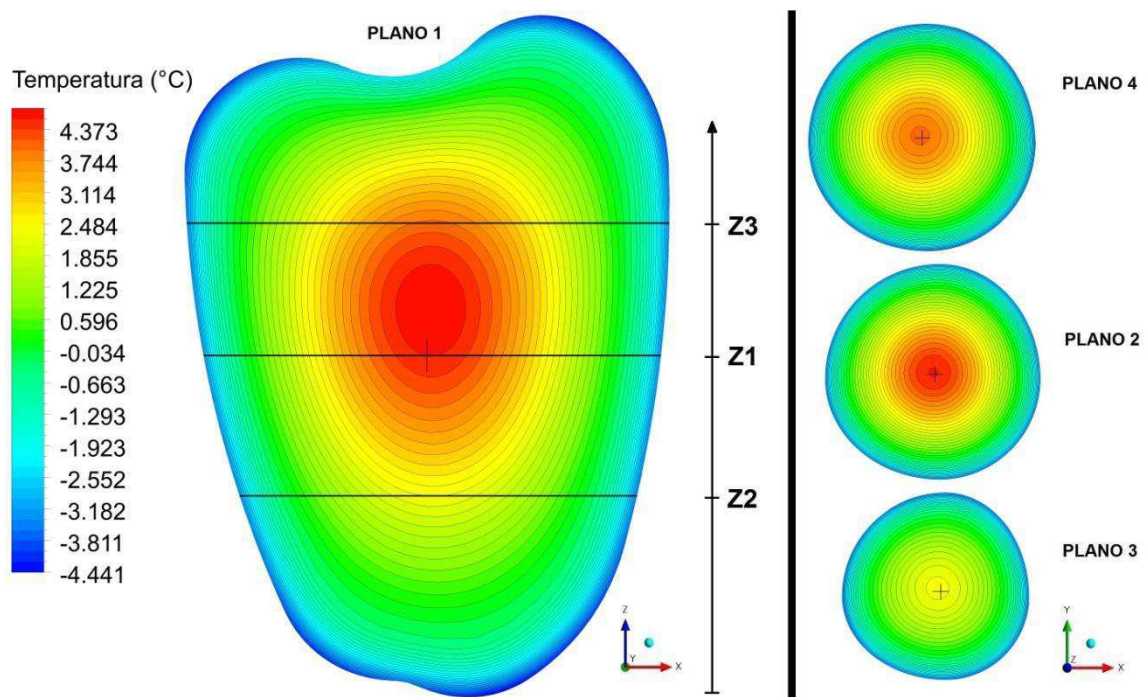


Figura 4.71: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_3 = 1500s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 10$  m/s. Fonte: Autoria própria.

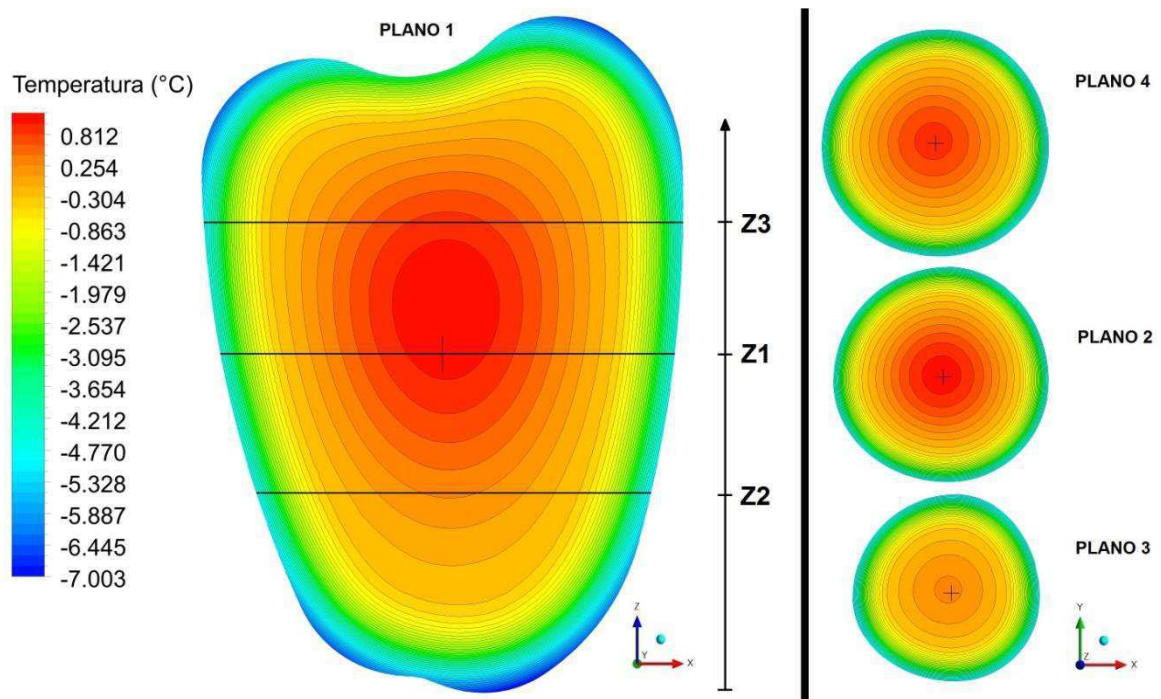


Figura 4.72: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_3 = 1500s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 10$  m/s. Fonte: Autoria própria.

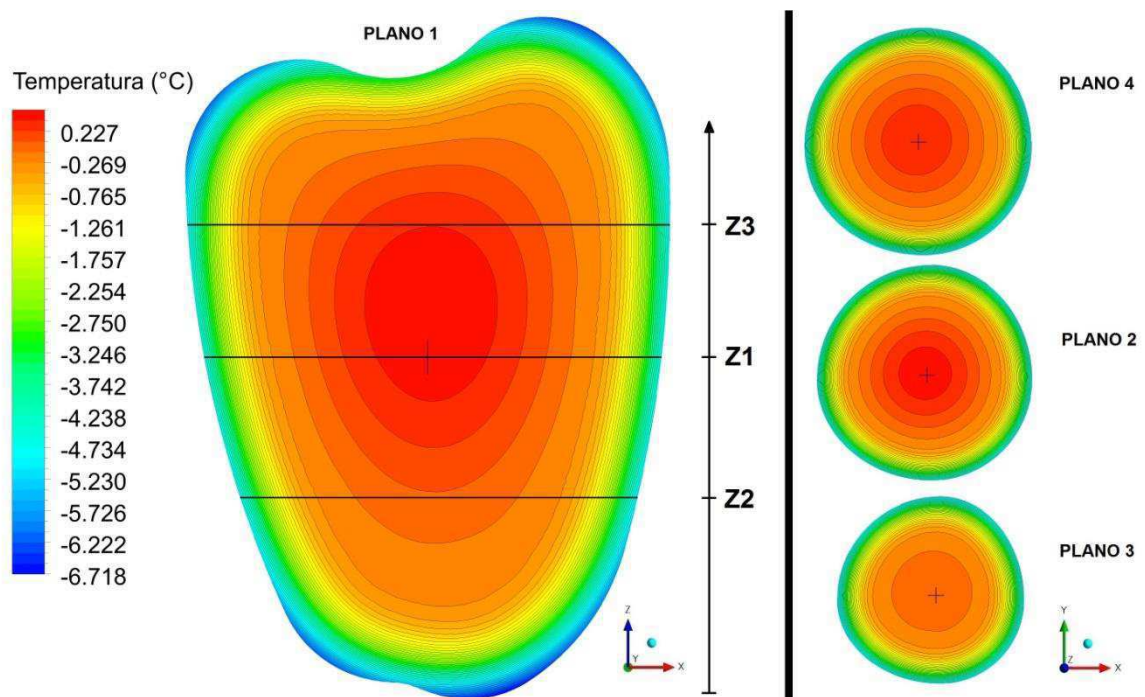


Figura 4.73: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_4 = 2000s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 10$  m/s. Fonte: Autoria própria.

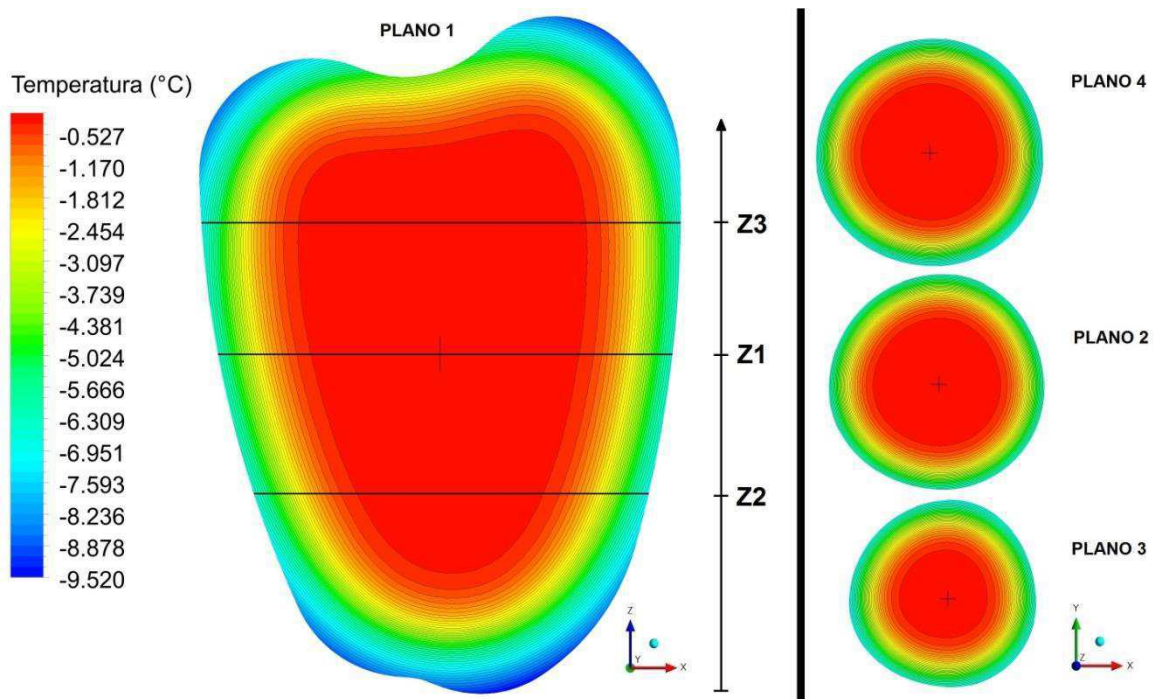


Figura 4.74: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_4 = 2000s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 10$  m/s. Fonte: Autoria própria.

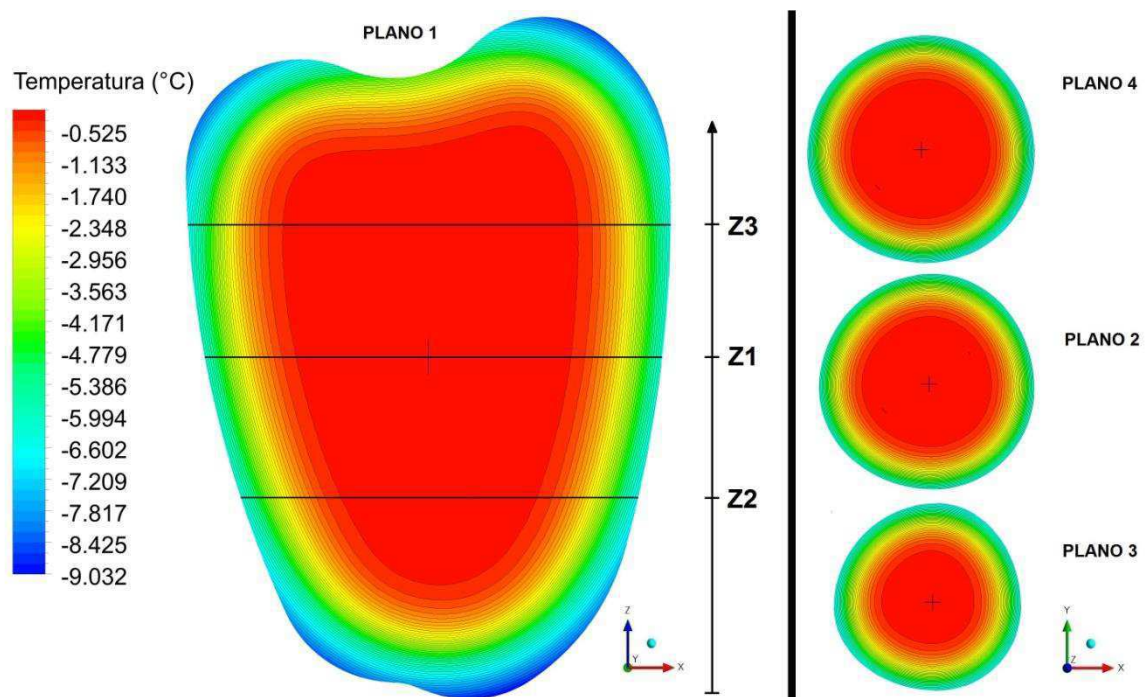


Figura 4.75: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_5 = 3000s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 10$  m/s. Fonte: Autoria própria.

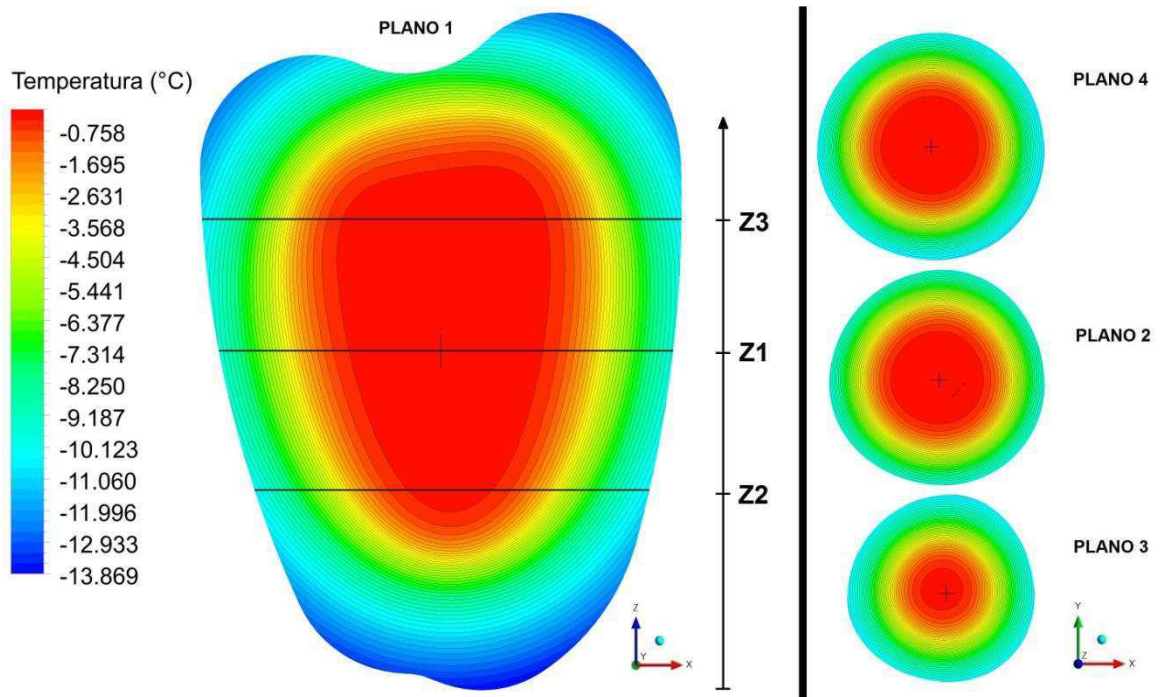


Figura 4.76: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_5 = 3000s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 10$  m/s. Fonte: Autoria própria.

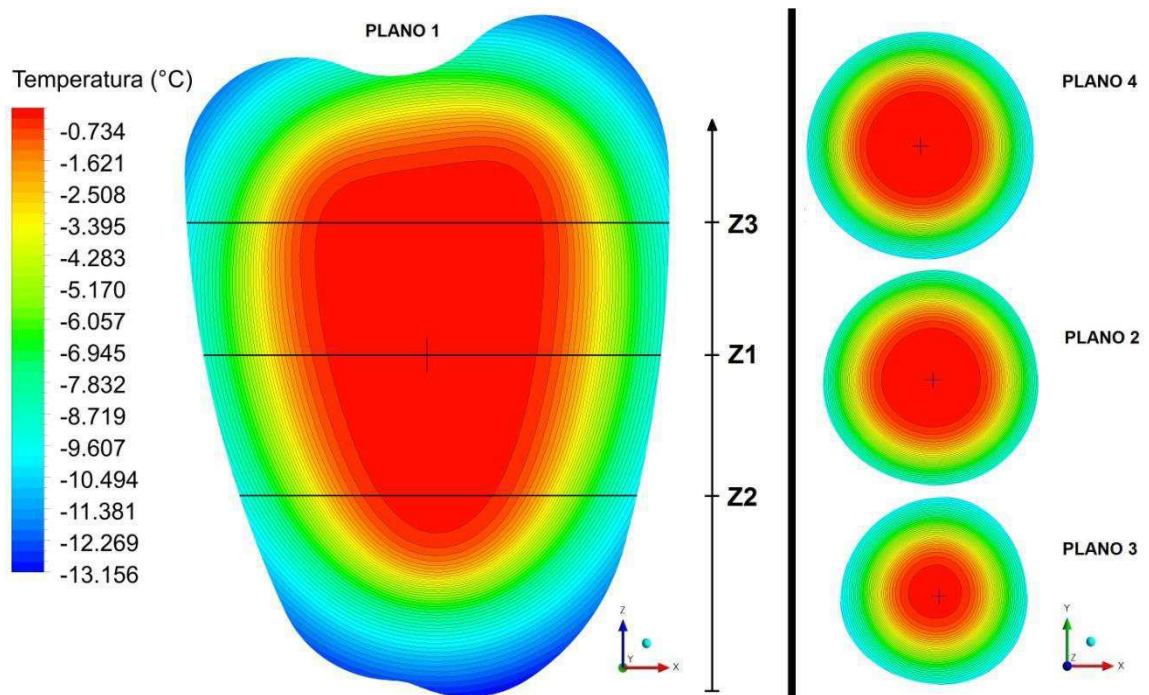


Figura 4.77: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_6 = 4000s$ , para  $X' = 80\%$  e  $V = 10$  m/s. Fonte: Autoria própria.

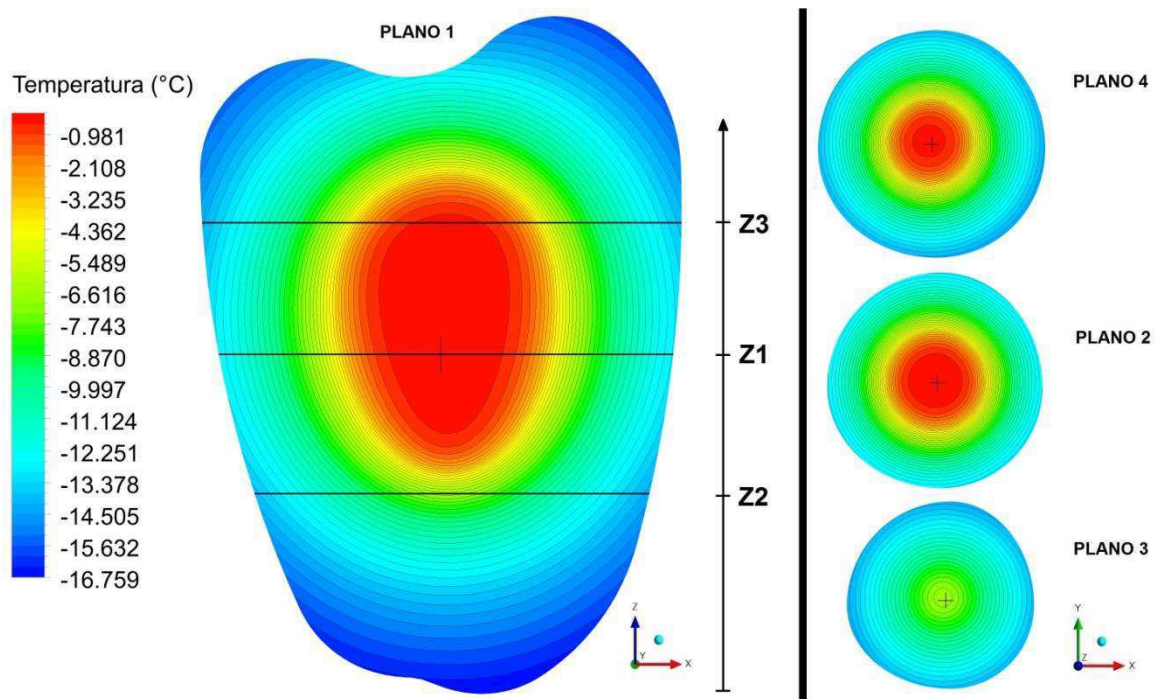
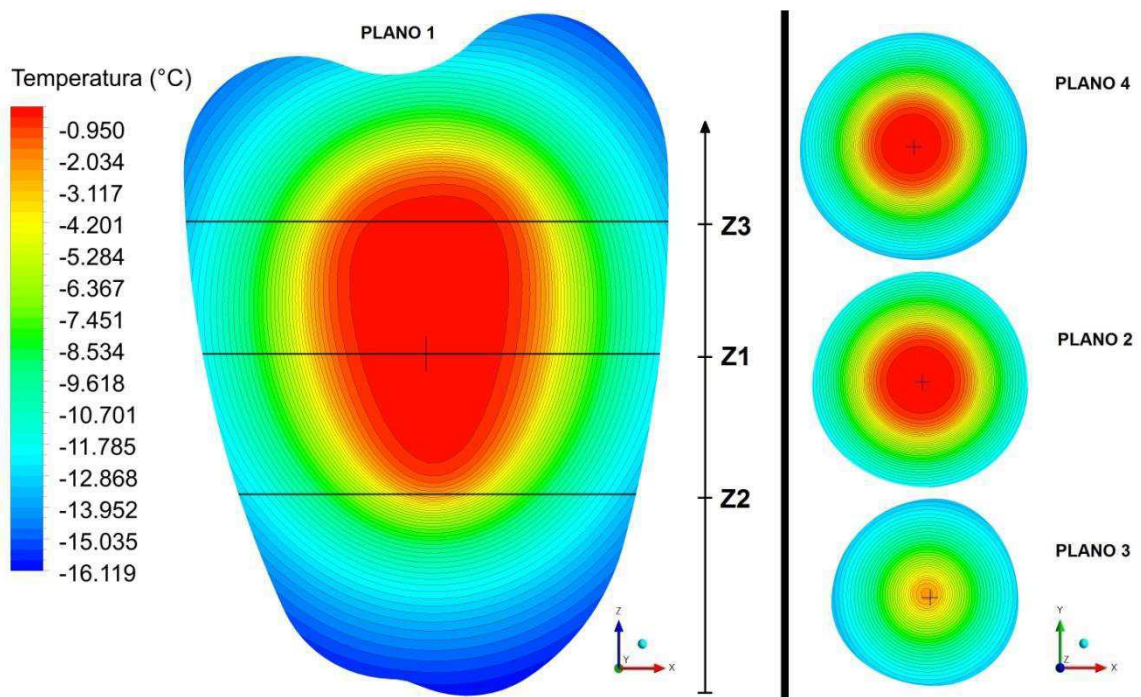


Figura 4.78: Perfil de temperatura dos planos 1, 2, 3 e 4 no tempo  $t_6 = 4000s$ , para  $X' = 90\%$  e  $V = 10$  m/s. Fonte: Autoria própria.



Das Figuras 4.67 e 4.68, observa-se que há um grande gradiente de temperatura, sendo as regiões extremas onde existe uma curvatura acentuada no

sólido as mais frias e a região central mais quente, contudo, para o sólido com  $X' = 90\%$ , essas temperaturas foram inferior ao do sólido com  $X' = 80\%$ , em razão de  $dT/dt$  apresentar um valor superior para  $X' = 90\%$  do que para  $X' = 80\%$ , outro fato importante a ser notável, é que o processo de mudança de fase no sólido foi iniciado num intervalo de tempo inferior a 500 segundos, assim, tanto o início da mudança de fase quanto o período onde  $dT/dt$  apresenta seu valor mínimo, encontram-se num intervalo de tempo próximos. Das Figuras 4.69 a 4.78 é possível observar que a região central do sólido da amostra com  $X' = 90\%$  consegue ser resfriada mais rapidamente que a amostra com  $X' = 80\%$ , enquanto que a superfície do sólido com  $X' = 80\%$  consegue ser resfriada mais rapidamente que a amostra com  $X' = 90\%$ .

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 5.1 Conclusões

Foram realizados experimentos para determinar a cinética de congelamento do pedúnculo do caju submetido à convecção natural. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

a) A metodologia experimental utilizada conseguiu uma repetibilidade dos resultados e foi executada de forma correta, visto que, as amostras ensaiadas apresentaram um comportamento similar e as curvas obtidas estão em conformidade com as curvas teóricas de congelamento lento reportadas na literatura.

b) A metodologia proposta por Rahman *et al.* (2002) para determinar as temperaturas inicial e final de congelamento apresentou-se adequada, sendo  $-0,370\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,109$ , a temperatura inicial de congelamento, e  $-4,562\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,869$ , a temperatura final de congelamento do pedúnculo do caju. Não foram encontrados na literatura qualquer referência as temperaturas inicial e final de congelamento do pedúnculo do caju, mas, quando comparados aos resultados reportados de alimentos que possuem

elevado teor de umidade, os valores obtidos de  $T_{cr}$  e  $T_f$  encontram-se coerentes ao expectável para esse tipo de alimento.

No que diz respeito aos resultados numéricos, conclui-se que:

a) O modelo proposto consegue descrever as etapas de resfriamento e de mudança de fase no processo de congelamento, porém, não consegue prever a etapa de pós-congelamento.

b) O bom ajuste alcançado entre as curvas obtidas experimentalmente e numericamente da temperatura em função do tempo e de sua derivada, evidenciam a validação física do modelo proposto, sendo este capaz de identificar os perfis de temperatura do pedúnculo do caju ao longo do tempo durante os processos de resfriamento e congelamento.

c) Os valores do coeficientes de transferência de calor por convecção obtido pela correlação matemática de Churchill e encontrado pelo ajuste numérico (6,94 W/ m<sup>2</sup> K e 6,42 W/ m<sup>2</sup> K, respectivamente), encontraram-se próximos, havendo uma diferença percentual de apenas 7,5%; tal diferença é aceitável, tendo em vista as hipóteses simplificadoras utilizadas.

d) Preconizou-se que o pedúnculo estivesse submetido ao processo de congelamento sob convecção forçada, onde o ar estaria numa temperatura de -20°C e uma variação de sua velocidade de 1 m/s, 5 m/s e 10 m/s, que acarretaria em diferentes coeficientes de transferência de calor por convecção (15,467 W/m<sup>2</sup> K, 37,562 W/m<sup>2</sup> K e 55,679 W/m<sup>2</sup> K, respectivamente), determinados pela correlação de Whitaker.

e) Foi verificada a influência da variação do teor de umidade no processo de congelamento, quando fixada a velocidade do ar, a variação dos teores de umidade teve pouca influência no tempo de resfriamento, visto que, ocorreu uma variação máxima de 7%, contudo, observou-se que as amostras com maiores teores de umidade apresentaram um resfriamento mais intenso durante o período do



resfriamento e menos intenso durante o período de congelamento, do que as amostras com menores teores de umidade.

f) Foi verificada a influência da variação do coeficiente de transferência de calor por convecção no processo de congelamento, quando fixado o teor de umidade e alterado a velocidade do ar de resfriamento, observou-se uma redução no tempo de resfriamento na ordem de 30% quando a velocidade variou de 1 m/s para 5 m/s, e de aproximadamente 9% ao variar a velocidade de 5 m/s para 10 m/s.

g) No que diz respeito aos perfis de temperatura, as amostras submetidas aos maiores coeficientes de transferência de calor convectivos, apresentaram maiores gradientes de temperatura entre a superfície da amostra e o seu centro geométrico, como também um decaimento mais intenso da temperatura do pedúnculo do caju. Observou-se ainda que, a região superficial que apresentou uma curvatura acentuada foi o local onde o processo de mudança de fase teve seu princípio, fato este observado em todas as amostras analisadas sob quaisquer condições de simulação.

h) Com relação a taxa de variação da temperatura no tempo,  $dT/dt$ , observou-se que, ao se fixar o teor de umidade e variar a velocidade do ar, todas as curvas apresentaram um aumento proporcional nos valores mínimos da função  $dT/dt$  independente do teor de umidade analisado, isto é, referenciando o valor de mínimo os das curvas de  $V = 1$  m/s, houve um aumento de aproximadamente 73% e 107% ao valor de mínimo das curvas para  $V = 5$  m/s e  $V = 10$  m/s, respectivamente.

i) Verificou-se também que, ao se fixar a velocidade do ar e variar o teor de umidade, houve um aumento no valor de mínimo das curvas  $dT/dt$  e uma diminuição do tempo para sua ocorrência, quando o teor de umidade aumenta.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para futuras pesquisas, pode-se citar:

a) Realizar experimentalmente a cinética de congelamento do pedúnculo do caju submetidos a convecção forçada e comparar com os resultados obtidos numericamente.

b) Realizar a cinética de congelamento de algum alimento que possua uma forma geométrica simples, fazer sua instrumentação com alguns termopares ao longo de seu comprimento, para verificar a distribuição da temperatura ao longo do tempo nos diversos pontos. Após essa análise, construir as curvas da temperatura em função do tempo e sua derivada no ponto central da geometria, e as curvas da temperatura em função do tempo dos outros pontos analisados para poder associar a derivada do ponto central com as mudanças que ocorrem no alimento durante o processo de congelamento.

c) Simular em outro *software* comercial, como o FLUENT, a cinética de congelamento do pedúnculo do caju, para verificar se este é capaz de prever todas as etapas do processo, ou seja, o resfriamento, congelamento e pós-congelamento. A partir dos perfis de temperaturas encontrados na simulação, associar tais perfis com a formação de cristais de gelo, no que diz respeito a forma e tamanho dos mesmos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, F. A. P. de. **Extrato do bagaço de caju rico em pigmentos**. Int. A23L 1/222, BR. n. PI 0103885-0. 19 jun. 2001. Disponível em: <<http://www.patentesonline.com.br/extrato-de-baga-o-de-caju-rico-em-pigmento-52549.html>>. Acesso em julho de 2016.

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

ALMEIDA, J. I. L.; BARROS, L. M.; LOPES, J. G. V.; ARAÚJO, F. E. Estudo sobre o crescimento do fruto e pseudofruto do cajueiro (*Anacardium Occidentale L.*) do tipo anão precoce. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 9, n. 3, p 21-30, 1987.

ARAGÃO, R. F. **Secagem de fatias de caju (*Anacardium occidentale L.*) em secador de bandejas**. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, p.126, 2007.

ARAÚJO, J. P. P. Agronegócio caju: práticas e inovações. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2013, 532 p.

ASCHERI, J. L. R.; OLIVEIRA, A.; AZEVEDO, T. L.; CARVALHO, C. W. P. Elaboração de farinha pré- gelatinizada de bagaço de caju e quirera de arroz através do processo de extrusão termoplástica. In: CONGRESSO DE PESQUISA CIENTÍFICA, 2.; JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2004, Seropédica. **Anais...** Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2004. 1 CD-ROM.

ASHRAE. Handbook of Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1993.

BARROS, L. M. Biologia floral, colheita e rendimento do cajueiro. In: LIMA, V. P. M. S. (Org.). **A cultura do cajueiro no Nordeste do Brasil**. Fortaleza: BNB/ETENE, 1988. p. 301-319.

BARROS, L. M. Botânica, origem e distribuição geográfica. In.: ARAÚJO, J. P. P.; SILVA, V. V. (Org.). **Cajucultura: modernas técnicas de produção**. Fortaleza: EMBRAPA-CNPc, 1995. p. 55-71.

BOONSUPTHIP, W.; HELDMAN, D.R. Prediction of Frozen Food Properties during Freezing Using Product Composition. **Journal of Food Science**, v.72, n.5, p.254-263, 2007.

BRASIL. Secretaria de Estado de Saúde de Mato Grosso do Sul, Glossário da Vigilância Sanitária. Disponível em: <[http://www.saude.ms.gov.br/index.php?templat=vis&site=116&id\\_comp=886&id\\_reg=348 &voltar=lista&site\\_reg=116&id\\_comp\\_orig=886](http://www.saude.ms.gov.br/index.php?templat=vis&site=116&id_comp=886&id_reg=348 &voltar=lista&site_reg=116&id_comp_orig=886)>. Acesso em: Julho de 2016.

CAMPOS, A. R. N., SANTANA, R. A. C., DANTAS, J. P., OLIVEIRA, L. S. C., SILVA, F. L. H. Enriquecimento protéico do bagaço do pedúnculo de caju por cultivo semi-sólido. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.5, n.2 p 1-11, 2005.

CARVALHO, P. E. R.; GAIAD, S. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Agência de Informações EMBRAPA. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: julho de 2016

CASTRO, L. R. **Análise dos parâmetros relacionados ao resfriamento a ar forçado em embalagens para produtos hortícolas**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, 161p. 2004.

CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; BRAGA, M.E.D.; SILVA, M. Curvas de congelamento de frutos de cajá (*Spondias lutea* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, Especial, n.1, p.55-62, 2003

CEINFO. Caju – perguntas e respostas – **Colheita e Conservação Pós Colheita do Pedúnculo**. Embrapa. Disponível em: <<http://www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/artigo.php?op=2&i=1&si=34&ar=98>>. Acesso em: Junho de 2016

CHAU, K. V.; GAFFNEY, J. J. A finite-difference model for heat and mass transfer in products with internal heat generation and transpiration. **Journal of Food Science**, v. 55, n.2, p 484-487,1990.

CHEN, Y-L.; PAN, B.S. Freezing tilapia by airblast and liquid nitrogen – freezing point and freezing rate. **International Journal of Food Science & Technology**, v.30, n.2, p 167-173, 1995.

CHITARRA, A. B. **Armazenamento de frutos e hortaliças por refrigeração**. Lavras: FAEPE, 1999.

CHITARRA, F.M.; CHITARRA, A.B. **Pós-Colheita de Frutas e Hortaliças: Fisiologia e Manuseio**, Lavras, 1990. 293 p.

CHITARRA, M.I.F.; CHITARRA, A.B. **Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio**. 2 ed. Lavras: UFLA, 2005, 785p

CHOI, Y.; M. R. OKOS. 1986. Effects of temperature and composition on the thermal properties of food. In **Food Engineering and Process Applications**. Ed. M. LeMaguer and P. Jelen. 1: 93-101. London: Elsevier Applied Science Publishers.

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.

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

CRISÓSTOMO, J. R.; CAVALCANTI, J. J. V.; BARROS, L. M.; ALVES, R. E.; FREITAS, J. G.; OLIVEIRA, J. N. Melhoria do cajueiro anão precoce: avaliação da qualidade do pedúnculo e a heterose dos seus híbridos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 447-480, 2002.

CRISÓSTOMO, L. A.; SANTOS, F. J. S.; OLIVEIRA, V. H.; VAN RAIJ, B.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A.; SOARES, I. **Cultivo do cajueiro anão precoce: aspectos fitotécnicos com ênfase na adubação e na irrigação**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2003. 8 p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Circular Técnica, 08).

CRUZ, V. M. F. da. **Secagem de produtos agrícolas, obtenção de fruta passa a partir do pseudofruto do cajueiro (*Anacardium occidentale L.*)**. Natal. UFRN, 1989. 101 p. Dissertação de Mestrado

DELGADO A. E.; GALLO, A.; PIANTE, D. DE; RUBIOLO, A. 1997. Thermal Conductivity of Unfrozen and Frozen Strawberry and Spinach. **Journal of Food Engineering** 31:137-146.

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.

DIAS, P. P. B.; OLIVEIRA, G. S. F. de. Pesquisa desenvolve creme inédito de amêndoa de castanha do caju. Pesquisas FUNCAP - **Revista de Ciência e Tecnologia** – vol. 2, p., 6 e 7, agosto de 2001.

DUSSÁN SARRIA, S.D. **Resfriamento rápido e armazenamento refrigerado do figo (*Ficus carica L.*) “roxo de valinhos” e seus efeitos na qualidade da fruta.** 2003. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola / FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2003.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Caju. **Programa Nacional de Pesquisa de Caju.** Fortaleza, 1991. 59 p. (EMBRAPA-CNPCa. Documentos, 5).

ENGINEERING TOOL BOX. Disponível em: <[http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-food-d\\_295.html](http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-food-d_295.html)>. Acesso em: junho de 2016.

FAO, Food And Agriculture Organization Of the United Nations. Summary of Food and Agriculture Statistics. Disponível em <http://faostat3.fao.org>, acessado em julho de 2016.

FELLOWS, P.J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: princípios e práticas.** São Paulo: Artmed; 2006.

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

FONTANA, A.J.; VARITH, J.; IKEDIALA, J.; REYES, J.; WACKER, B. Thermal properties of selected foods using a dual needle heat-pulse sensor. In: **ASAE/CSAE - SCGR 1999 MEETING**, 1999, Toronto. Proceedings... St Joseph: ASAE, 1999, 10p.

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

FRANCO, B.D.G.M.; LANDGRAF, M.; DESTRO, M.T. **Microbiologia dos Alimentos.** Atheneu: São Paulo, Brasil. p.183, 1996.

FREITAS, A.C.; FIGUEIREDO, P. Conservação por Utilização de Baixas Temperaturas. In: **Conservação de Alimentos**. Lisboa, p. 129-136, 2000.

FROTA, P. C. E.; PARENTE, J. I. G. Clima e fenologia do cajueiro. In: ARAÚJO, J. P. P.; SILVA, V. V. (Org.). *Cajucultura: modernas técnicas de produção*. Fortaleza: EMBRAPA-CNPAT, 1995. p. 43-54

FUNDAÇÃO BANCO DO BRASIL. Fruticultura caju. Desenvolvimento Regional Sustentável - Série cadernos de propostas para atuação em cadeias produtivas. Disponível em: <<http://www.bb.com.br/docs/pub/inst/dwn/Vol4FruticCaju.pdf>>. Acesso em: Junho de 2016.

GALVÃO, A. M. P. **Aproveitamento da fibra de caju (*Anacardium occidentale*, L.) na formulação de um produto tipo hambúrguer**. 2006. 75 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

GAVA, A. J. *Princípios de Tecnologia de Alimentos*. Editora Nobel, São Paulo, 2007.

HAYAKAWA, K-I.; SUCAR, J. Heat transfer and moisture loss of spherical fresh produce. **Journal of Food Science**, v. 47, p 596-605, 1982

HEAP, R. D. (2000) Refrigeration of chilled foods. In: C. Dennis and M. Stringer (eds) *Chilled food*, 2nd edn. Ellis Horwood Ltd, Chichester, Ch. 3.

HELDMAN, D.R.; LUND, D.B. Food Freezing. In: HELDMAN, D.R. **Handbook of Food Engineering**. 2ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 427-469.

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. **Produção agrícola municipal**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp?o=18&i=P>>. Acesso em julho 2016

INCROPERA, Frank P; DEWITT, David P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*, 6ª. Edição, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JAY, J. M. **Microbiologia de alimentos**. Porto Alegre: Artmed, p. 711, 2005.

JIE, W.; LITE, L.; YANG, D. The correlation between freezing point and soluble solids of fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 60, p. 481–484, 2003.

KUROZAWA, L. E.; PARK, K. J.; HUBINGER, M. D.; MURR, F. E. X.; AZOUBEL, P. M. Thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya* L.) and

cashew apple (*Anacardium occidentale* L.). **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 78-85, 2008

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

LEITE, L. A. S. **A agroindústria do caju no Brasil: políticas públicas e transformações econômicas**. 1994. 176 f. Tese (Doutorado em Política Econômica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

LEITE, L. A. S.; PESSOA, P. F. A. P.; 2004; **Cultivo do cajueiro no Nordeste brasileiro: o agronegócio caju**; 12<sup>o</sup> AGRINORDESTE, Olinda-PE. Disponível em: [www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/arquivos/artigo\\_583.pdf](http://www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/arquivos/artigo_583.pdf). Consultado em julho de 2016.

LIMA, J. R. Caracterização físico-química e sensorial de hambúrguer vegetal elaborado à base de caju. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 191-195, 2008.

LIMA, J. R.; BRUNO, L. M.; SOUZA NETO, M. A. **Estabilidade durante armazenamento de hambúrguer vegetal elaborado à base de caju**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2011. 20 p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 43).

LIMA, L. M. O.; MAGALHÃES, M. M. A.; MEDEIROS, M. F. D.; ALSINA, O. L. S. Utilização de fibras obtidas do bagaço de frutas tropicais no enriquecimento de biscoitos regionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 18., 2002, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2002. 1 CD-ROM.

LIMA, V. P. M. S. Botânica do cajueiro. In: LIMA, V. P. M. S. (Org.). **A cultura do cajueiro no Nordeste do Brasil**. Fortaleza: BNB/ETENE, 1988. p. 15-61.

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, 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



MAIA, G. A., FIGUEIREDO, R. W., SANTOS, P. H. M. Técnica aumenta tempo de conservação da goiaba. **Revista de Ciência e Tecnologia da FUNCAP** – v. 4, n. 1, p 11-12, 2002.

MALISKA, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 2º edição, 2004. 453 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.

MARINI, G. A.; BAINY, E. M.; LENZI, M. K.; CORAZZA, M. L. Freezing and thawing of processed meat in an industrial freezing tunnel. **Acta Scientiarum. Technology**, v.36, n. 2, p. 361-368, 2014.

MARQUES, L. F. **Processamento do pedúnculo do caju em avançado estágio de maturação: Desidratação osmótica e secagem para elaboração de passas de caju**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. Paraíba. p.121, 2006

MARQUES, L. F.; COSTA, T. L.; MOURA, R. L.; COSTA, A. M. N. M.; CHAVES, C. G.; FREITAS, R. M.; ROCHA, E. M. F. F.; MOURA, L. B. Produção e aceitação sensorial de pão tipo hambúrguer fabricado com adição de 10% de farinha do bagaço de caju. In: JORNADA NACIONAL DA AGROINDÚSTRIA, 3., 2008. **Resumos...** Bananeiras : [s.n.], 2008.

MATIAS, M. F. O.; OLIVEIRA, E. L.; GERTRUDES, E.; MAGALHÃES, M. M. A. Use of fibres obtained from cashew (*Anacardium occidentale*, L) and guava (*Psidium guajava*) fruits for enrichment of food products. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 48, p. 143-150, 2005.

MATTOS, J. S. **Banco de dados de propriedades termofísicas de produtos hortícolas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas. 139p. 2007

MECOL. **Metalurgica Cobica LTDA. Castanha de caju. Disponível em:** <<http://www.mecol.com.br/portugues/informacajuebrasil.htm>>. Acesso em: Julho de 2016

MELONI, P. L. S. **Curso produção de frutas desidratadas e tomate seco em conserva**. Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa-MG, 2006.

MENEZES, J. B.; ALVES, R. E. Fisiologia e tecnologia pós colheita do pedúnculo do caju. Fortaleza: EMBRAPA-CNPAT, 1995. 20p. (EMBRAPA-CNPAT, Documentos, 17).

MICHALEWICZ, J. S. **Estudo Numérico e Experimental da Transferência de Calor e Massa no Pseudofruto do Caju (*Anacardium Occidentale* L)**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife. 159 p. 2011

MILLER, J. Cryogenic food freezing systems. *Food Processing* v.67, n. 8, p 22-23, 1998.

MOHSENIN, N. N. Thermal properties of foods and agricultural materials. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1980.

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.

NECKEL, V. J.; MARIANI, V. C.; AMARANTE, A. C. C.; SILVA, A. Estudo do Congelamento de um Produto Sujeito a Diferentes Coeficientes de Troca Térmica. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. 2010. Campina Grande. Anais do VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), Campina Grande, Brasil, 2010.

NOBRE, J. A. S.; LIMA, D. M. Tecnologia do Processamento de Alimentos: Projeto Formare. São Paulo. Grupo Ibmec Educacional, 2011.

NUNES, A. S; PARK, K. J.; FABBRO, I. M. D.; PARK, J. K. B.; BROD, F. P. R. Métodos de determinação experimental da condutividade e difusividade térmica de materiais biológicos – revisão. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas, v.36, n.1: p.55-68, jan-jun, 2002.

OLIVEIRA, F. M. N.; SILVA, A. S.; ALMEIDA, F. C.; ALVES, N. M. Influência do branqueamento no processo da cinética de secagem do caju. **I Simpósio Brasileiro de Pós colheita de Frutas Tropicais – SBPCFT**, João Pessoa – PB, 2005. Anais.

OLIVEIRA, V. H. **Cultivo do cajueiro anão precoce**, 2. ed. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2008. 44 p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Sistema de Produção, 1).

ORDÓÑEZ, J.A. **Tecnologia de Alimentos**: Componentes dos Alimentos e Processos. Porto Alegre: Artmed; 2005.

PAIVA, F. F. A. **Processamento do pedúnculo de caju: doce de caju em calda.** Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2010. 23 p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Documentos, 128).

PAIVA, F. F. de A.; GARRUTI, D. dos S.; SILVA NETO, R. M. da. Aproveitamento Industrial do caju. Fortaleza: Embrapa-CNPAT/SEBRAE/CE, 2000. 88p. (Embrapa-CNPAT. Documentos, 38).

PARENTE, J. I. G.; BUENO, D. M. Recuperação de cajueiro-comum de baixa produção pela substituição de copa, através da enxertia. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 13, n. 2, p, 195-197, 1991.

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

PEIXOTO, R.A., VODIANITSKAIA, P, PAIVA, M.A.S.; SILVARES, O.M. A Substituição dos CFCs e HCFCs e a Indústria de Refrigeração. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, Brasília, DF, pp.773-776, 1993.

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

PINHO, L. X. **Aproveitamento do resíduo do pedúnculo do caju (*Anacardium occidentale* L.) para alimentação humana.** 2009. 85 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

PINTO, P.M.Z.; MORAIS, A.M.M.B. **Boas Práticas para a Conservação de Produtos Horto frutícolas.** Porto: Associação para a Escola Superior de Biotecnologia da Universidade Católica, 2000.

PIROZZI, D.C.Z.; AMENDOLA, M. Modelagem matemática e simulação numérica do resfriamento rápido de morango com ar forçado. **Engenharia Agrícola**, v.25, p.222-230, 2005.

POTTER, N. N. **Food Science.** New York: Academic, p.713, 1995.

RAHMAN, M. S.; RUIZ, J. F. V. Food Preservation by Freezing. In: RAHMAN, M. S. **Handbook of Food Preservation.** Boca Raton: CRC Press, p. 635-657, 2007.

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.

RAHMAN, M.S.; MACHADO-VELASCO, K.M.; SOSA-MORALES, M.E., VELEZ-RUIZ, J.F. Freezing Point: Measurement, Data and Prediction. In: RAHMAN, M.S. **Food Properties Handbook.** 2ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. p. 154-192.

RESENDE, E. D. de. **Técnicas de modelagem, simulação e otimização de processos de refrigeração e de congelamento**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2000.

RIBERO, G. G.; RUBIOLO, A.C.; ZORRILA, S. E. Initial freezing point of mozzarella cheese. **Journal of Food Engineering**, v.81, p. 157-161, 2007.

ROSSI, S. J. **Desenvolvimento e Avaliação de uma Bomba de Calor usada no Condicionamento de Ar para Secagem de Alimentos**. Dissertação de Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, 1993.

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

SANTANA, M. F. S.; SILVA, I. C. **Elaboração de biscoitos com resíduo da extração de suco de caju**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2008. 4 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Comunicado técnico, 214).

SGARBIERI, V.C. **Alimentação e Nutrição: Fator de Saúde e Desenvolvimento**. Campinas: Unicamp, p. 276-323, 1987.

SILVA, B. F. **Escoamento Anular de Óleo Ultraviscoso e Água em Dutos Curvados: Análises Hidrodinâmica e Energética**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. Paraíba. p.100, 2016.

SILVA, J. S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas, Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 560 p.

SILVA, M. da. **Cinética de resfriamento e congelamento dos frutos de cajá (*Spondias lutea*, L.)**. Campina Grande-PB: UFCG, 2002. 100p. Dissertação Mestrado

SILVA, M. M. da. **Modelagem e simulação da transferência de calor em alimentos com forma paralelepipedal**: estudo de caso: resfriamento e congelamento de batatas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2005. 64f.

SIQUEIRA, S. P.; RETDO, J. C.; MARCELLINI, P. S.; FARIA, J. F. Substituição parcial da carne bovina por bagaço de caju na elaboração de hambúrgueres. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 18., 2002, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2002. 1 CD-ROM.

STAMM, R.H. :Industrial refrigeration: system types. **Heating/Piping/Air Conditioning**, May, 119-127, 1984.

STOECKER, W.F. & Jabardo, J.M.S. Refrigeração Industrial. Edgard Blücher Ltda, SP, Abrava-IBF, 1994.

STRAPASSON, F. A., 2006, “Modelagem do congelamento de um alimento de forma geométrica tridimensional submetido a um campo variável de coeficientes de troca térmica”. Relatório Final apresentado ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Paraná.

TACO - Tabela brasileira de composição de alimentos / NEPA – UNICAMP.- 4. ed. rev. e ampl.. -- Campinas: NEPAUNICAMP, 2011. 161 p.

TAVARES, D. P. S. **Escoamento Trifásico Não-Isotérmico em Oleodutos Horizontais com Vazamento: Modelagem e Simulação**. 104p, Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, (2012).

THOMPSON, J. F.; MITCHELL, F. G.; RUMSEY, T. R.; KASMIRE, R. F.; CRISOSTO, C.H. **Commercial Cooling of Fruits, Vegetables and Flowers**, Cap. 4 e 5. Universidade da Califórnia – Divisão de agricultura e recursos naturais, Publicação 21567, p.33-34, 1998.

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.

TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering**. New York: Chapman e Hall, p 398-436, 1991.

TREICHEL, M.; KIST, B. B.; SANTOS, C. E. DOS; CARVALHO, C. DE; BELING, R. R. **Anuário brasileiro da fruticultura 2016**. Santa Cruz do Sul. Editora Gazeta Santa Cruz, 88 p. 2016.

UCHOA, A. M. A. **Adição de pós alimentícios obtidos de resíduos de frutos tropicais na formulação de biscoitos**. 2007. 91 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

UCHOA, A. M. A.; COSTA, J. M. C.; MAIA, G. A.; SILVA, E. M. C.; CARVALHO, A. F. F. U.; MEIRA, T. R. Parâmetros físico-químicos, teor de fibra bruta e alimentar de pós alimentícios obtidos de resíduos de frutas tropicais. **Segurança Alimentar e Nutricional**, Campinas, v. 15, n. 2, p. 58-65, 2008.

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

VERSTEIG, H. K. and MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 503p., 2 ed., England: Ed. Pearson Education Limited, (2007).

WOJSLAW, E. B. Tecnologia de alimentos. Caderno de Estudo e Pesquisa. Brasília-DF. 143 p. 2012. Disponível em: <[http://lms.ead1.com.br/webfolio/Mod4916/tecnologia\\_de\\_alimentos\\_v1.pdf](http://lms.ead1.com.br/webfolio/Mod4916/tecnologia_de_alimentos_v1.pdf)>. Acesso em julho de 2016.