

Paula Gimenez de Souza

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AÇAÍ
(*Euterpe oleracea* Mart.) DESIDRATADO EM PÓ POR CAST-
TAPE DRYING

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi

Coorientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Souza, Paula Gimenez de
Produção e caracterização de açaí (Euterpe oleracea Mart.)
desidratado em pó por cast-tape drying / Paula Gimenez de
Souza ; orientador, Bruno Augusto Mattar Carciofi ;
coorientador, João Borges Laurindo. - Florianópolis, SC,
2015.
144 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Alimentos.

Inclui referências

1. Engenharia de Alimentos. 2. Secagem. 3. Refractance
Window. 4. Antocianinas. 5. Reologia. I. Carciofi,
Bruno Augusto Mattar. II. Laurindo, João Borges. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Alimentos. IV. Título.

Paula Gimenez de Souza

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AÇAÍ
(*Euterpe Oleracea* Mart.) DESIDRATADO EM PÓ POR CAST
TAPE DRYING

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos.

Florianópolis, 02 de setembro de 2015.

FOLHA DE ASSINATURAS

AGRADECIMENTOS

A Deus por permitir viver todos os dias que fizeram parte deste trabalho, me mantendo firme e colocando pessoas maravilhosas no meu caminho. A minha família pelo incentivo, apoio, paciência, respeito e, principalmente, ao amor, que me conduzem em todos os momentos da minha vida e que abrem mão da própria vida para não me deixar desistir dos meus sonhos.

Ao professor Bruno Augusto Mattar Carciofi pelas horas dedicadas a discussões, indagações e desabafos de todos os gêneros. Obrigada professor, por nunca desistir do meu trabalho e sempre mostrar a luz “no fim do túnel”, mesmo estando longe.

Ao professor João Borges Laurindo por se prontificar a ser meu coorientador e apresentar contribuições para este e para futuros trabalhos.

A Angelise Durigon por ser muito mais que uma amiga de trabalho. Você se tornou uma irmã e uma supervisora determinada e carinhosa. Obrigada por estar realmente ao meu lado desde o início dos trabalhos, explicando e não me deixando perder tempo. Obrigada por tantas horas durante as noites, os finais de semana e feriados que você se prontificou a me responder e, principalmente, a me ensinar com toda a dedicação possível. Obrigada por ser essa pessoa maravilhosa no meu caminho que me acolheu e não me deixou desistir nos piores momentos.

A Nathália Buss da Silva por ser uma amiga inseparável, que me incentiva e nunca me deixa “cair”. Pelos incontáveis dias ouvindo meus desabafos e deixando minha mente mais “clara”. Obrigada por todos os comentários e discussões nesse trabalho e na minha vida.

A Amanda Coelho da Costa por ser uma amiga inseparável e que está presente em todos os momentos. Apesar da distância, suas vibrações positivas e seu carinho me fazem mais forte.

A Emanuele Parisotto e a Natália Joenck por fazerem o meu mestrado mais divertido e entenderem todas as aflições pelas quais passamos nesse momento! Nada melhor do que ter com quem compartilhar os estudos e as decisões mais importantes da nossa vida.

A todos os meus amigos e colegas de laboratório que seja com um sorriso, um abraço ou uma conversa na hora do café tornaram esse caminho mais “doce”. Obrigada por me ajudarem com os tratamentos de dados, com a divisão dos equipamentos e, principalmente, pelo companheirismo.

RESUMO

O açaí é uma fruta de interesse comercial devido as suas propriedades antioxidantes e energéticas, no entanto sua elevada perecibilidade torna necessário seu processamento. O *cast-tape drying* (CTD) é uma alternativa para secagem de alimentos termossensíveis pelas temperaturas moderadas e baixo tempo de exposição ao calor pelo produto. Optou-se, então, pela produção de pó de açaí por CTD (temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C e espessuras de filme de 2 e 3 mm) para avaliar as características físico-químicas do produto e comparar com o liofilizado. Foram determinadas as evoluções temporais da umidade e da temperatura da polpa (termopares e termografias) e realizou-se o cálculo das taxas de secagem e da capacidade evaporativa (CE). As contribuições da condução e da radiação para a secagem foram determinadas pelas leis de *Fourier* e de *Stefan-Boltzman*, respectivamente. Os pós foram caracterizados quanto: umidade, atividade de água (a_w), cor, distribuição no tamanho das partículas, morfologia, microscopia óptica (MO), massas específicas aparente e real, porosidade, solubilidade aparente, tempo de dispersão, compostos fenólicos totais, antocianinas (cianidina-3-glicosídeo) e atividade antioxidante (ABTS e DPPH). Os pós foram reidratados e analisados quanto à: umidade, a_w , sólidos solúveis, pH, cor, MO e comportamento reológico. A maior CE foi de $7,05 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para a condição de 90 °C/2 mm, valor superior em 587 % em relação à de 65 °C/3 mm. As polpas submetidas a 80 e 90 °C apresentaram uma maior distribuição das moléculas de óleo na superfície das partículas e propriedades químicas semelhantes. A redução das antocianinas foi de 60 % para 65 °C e de 47,6 % para 80 e 90 °C. As polpas reconstituídas apresentaram comportamento pseudoplástico com uma maior viscosidade para as condições submetidas a 65 °C. O CTD permite a produção de pó de açaí, sendo indicada a condição a 90 °C/2 mm em razão da superioridade da taxa de secagem e da manutenção das características químicas. No entanto, em termos de viscosidade, indicam-se as condições a 65 °C em virtude da menor alteração na estrutura.

Palavras-chave: Secagem. *Refractance Window*. Liofilização. Capacidade evaporativa. Antocianinas. Reologia.

ABSTRACT

Açaí is an important fruit for the market due to their antioxidant and energetic properties related to its chemical composition. The cast-tape drying (CTD) is an alternative to dry thermosensible foods due to the moderate temperatures and short exposition time to heat by the product. Thus, this study will evaluate the production and the physic-chemical characterization of powder açaí processed by CTD (heating temperatures of 65, 80 and 90 °C and spread gap of 2 and 3 mm) and freeze-drying. The pulp's temporal evolutions of the humidity and temperatures (termopars and termografs) were determined, follow by the calculation drying rate and evaporation capacity (CE). The contribution of conduction and radiation for the drying were determined by the Fourier and Stefan-Boltzman law's, respectively. The powders were characterized in relation to: humidity, water activity (a_w), color, particle size distribution, morphology, optical microscopy (MO), bulk and real density, porosity, apparent solubility, dispersion time, polyphenolic components, anthocyanin (cyanidin-3-glucoside) and antioxidant activity (ABTS and DPPH). The powders were re-hydrates and analyzed in relation to: humidity, a_w , soluble solids, pH, color, MO and rheological behavior. The highest CE is $7.05 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ for the condition 90 °C/2 mm, which is 587 % higher than 65 °C/3 mm. The pulps submitted to 80 and 90 °C showed a higher distribution of oil molecules in the surface of the particles and chemical properties similar. The reduction of the anthocyanins was 60 % for 65 °C and 47.6 % for 80 and 90 °C. The re-hydrated pulps showed pseudoplastic behavior with higher viscosity for conditions submitted at 65 °C. The TCD permits a production of açaí powder which is indicated at a condition of 90 °C/2 mm, due to a better drying rate and chemical characteristics. However, in terms of rheological behavior, condition at 65 °C are suggests, because of the reduction of the structure alteration.

Keywords: Drying. Refractance Window. Freeze-Drying. Evaporative Capacity. Anthocyanin. Rheological Behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma com as etapas de fabricação da polpa de açaí congelada.....	33
Figura 2 - Curva típica da taxa de secagem em condições constantes de processo.....	35
Figura 3 - Representação esquemática de um <i>Refractance Window</i> contínuo.....	38
Figura 4 - Representação esquemática do circuito térmico no <i>Refractance Window</i> , onde T são as temperaturas – sendo que os índices são referentes à água (w), a interface água-Mylar (b), a interface Mylar-polpa (i), interface polpa-ar (u) e a do ar (a) -; L_m e L_p são as espessuras do Mylar e da polpa, respectivamente; e q é a taxa de transferência de calor – índices são referentes à transferência entre a água aquecida e a superfície do Mylar (w); através do Mylar (m); através da polpa (p) e entre a superfície da polpa e o ar (a). A taxa de evaporação é representada por mv	39
Figura 5 . Transmissividades do Mylar utilizado no <i>Refractance Window</i> (RW) e no filme Mylar recoberto com tinta preta (BF).	42
Figura 6 . Poder emissivo espectral do corpo negro.....	43
Figura 7 - Representação esquemática da reconstituição de pós.....	46
Figura 8 – Fluxograma representativo das etapas e análises realizadas no presente estudo.	48
Figura 9 - Representação esquemática do secador utilizado para o desenvolvimento do estudo.	49
Figura 10 - Divisão do espalhamento em três regiões distintas como indicado pelos números 1, 2 e 3 para a retirada das amostras nos tempos de secagem pré-determinados.	50
Figura 11 - Representação dos pontos () da polpa onde os termopares foram posicionados para a realização do perfil de temperatura e analisados no software FLIR QuickReport 1.2 SP2 para determinação da temperatura nas termografias.	53
Figura 12 - Aparato experimental desenvolvido e adaptado por Dacanal (2005) utilizado para determinar o tempo de dispersão dos pós de açaí.	58

Figura 13- Curva de secagem adimensionalizada da polpa de açaí espalhadas sobre o Mylar com *gap* nas espessuras de 2 e 3 mm em relação à umidade da polpa *in natura*. As cores azul, preta e vermelha representam as temperaturas de 65, 80 e 90 °C, respectivamente. Os modelos exponenciais ajustados aos dados experimentais – com os respectivos desvios-padrão - são representados pelas linhas contínuas nas respectivas cores. 65

Figura 14 - Avaliação da influência do *gap* de espalhamento de 2 e 3 mm da polpa de açaí sobre o Mylar utilizado na curva de secagem adimensionalizada em relação à umidade da amostra *in natura*. Os pontos experimentais com os respectivos desvios-padrão e modelos – dados ajustados pelo modelo exponencial - representados com menor e maior largura estão relacionados às espessuras de 2 e 3 mm, respectivamente. As cores azul, preta e vermelha representam as temperaturas de 65, 80 e 90 °C, respectivamente..... 66

Figura 15 - Divisão do decaimento da umidade (adimensionalizada em relação à umidade inicial) nas regiões linear e decrescente - representados pelos ícones amarelos e verdes - juntamente com os modelos linear e exponencial ajustados aos dados, respectivamente. (a) 65 °C/2 mm; (b) 65 °C/3 mm; (c) 80 °C/2 mm; (d) 80 °C/3 mm; (e) 90 °C/2 mm; (f) 90 °C/3 mm. 68

Figura 16- Taxas de secagem da polpa de açaí espalhadas com *gap* de 2 (à esquerda) e 3 mm (à direita) obtidas a partir da derivada da curva suavizada aplicada ao modelo exponencial dos dados do decaimento da umidade *vs* tempo de secagem. As temperaturas de 65, 80 e 90 °C são representadas pelas cores azul, preta e vermelha, respectivamente. 72

Figura 17- Taxas de secagem obtidas a partir da derivada das curvas suavizadas aplicada ao modelo exponencial dos dados do decaimento da umidade *vs* tempo de secagem nas temperaturas de 65, 80 e 90 °C, representadas pelas cores azul, preta e vermelha, respectivamente. A representação das linhas com menor e maior largura estão relacionados às espessuras do *gap* de 2 e 3 mm, respectivamente..... 72

Figura 18 - Taxas de secagem da polpa de açaí espalhadas com *gap* de 2 (à esquerda) e 3 mm (à direita) obtidas a partir da derivada da curva suavizada do modelo de duas fases aplicado para o decaimento da

umidade (adimensionalizada em relação à amostra inicial) vs tempo. As temperaturas de 65, 80 e 90 °C são representadas pelas cores azul, preta e vermelha, respectivamente. A parte tracejada e contínua das curvas representam os períodos de tava constante e decrescente, respectivamente. 74

Figura 19 -Taxas de secagem obtidas a partir da derivada das curvas suavizadas do modelo de duas fases aplicado no decaimento da umidade (adimensionalizada em relação à amostra inicial) nas temperaturas de (a) 65 – 2 mm (azul) e 3 mm (verde); (b) 80 – 2 mm (preto) e 3 mm (roxo); e (c) 90 °C – 2 mm (vermelho) e 3 mm (amarelo). A representação das linhas tracejada e contínua está relacionada à taxa constante e decrescente, respectivamente. 74

Figura 20- Imagens da secagem da polpa de açaí a 90 °C e 3 mm em diferentes tempos de secagem. 76

Figura 21- Capacidade evaporativa em função da umidade adimensionalizada (em relação à amostra in natura), determinada a partir do modelo exponencial ajustado para o decaimento da umidade vs tempo de secagem. As linhas azul, preta e vermelha estão relacionadas às temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C, respectivamente. A menor e a maior espessuras estão associadas ao *gap* de 2 e 3 mm, respectivamente. 78

Figura 22- Capacidade evaporativa em função da umidade adimensionalizada (em relação à amostra in natura), determinada a partir do modelo de duas fases ajustado para o decaimento da umidade vs tempo de secagem. As linhas azul, preta e vermelha estão relacionadas às temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C, respectivamente. A menor e a maior espessuras estão associadas ao *gap* de 2 e 3 mm, respectivamente. E as linhas pontilhadas e contínuas estão associadas às fases linear e decrescente, respectivamente. 78

Figura 23- Evolução temporal da temperatura da polpa de açaí analisada por meio das termografias e dos termopares, representados pelos pontos de cor preta e cinza, respectivamente. Símbolos iguais representam a avaliação da temperatura no mesmo ponto do espalhamento. São indicadas as temperaturas de 65 °C e espessuras de 2

(a) e 3 (b) mm; 80 °C e espessuras de 2 (c) e 3 (d) mm; e 90 °C e espessuras de 2 (e) e 3 (f) mm.....	81
Figura 24- Distribuição do tamanho de partícula dos pós.....	86
Figura 25 - Morfologia dos pós de açaí resultantes das secagens a 65 °C – 2 (a) e 3 (b) mm; 80 °C – 2 (c) e 3 (d) mm; 90 °C – 2 (e) e 3 (f) mm; e para o pó liofilizado (g). Aumento de 100x em MEV.....	88
Figura 26 - Microscopia óptica dos pós de açaí obtidos pelas secagens a 65 °C – 2 (a) e 3 (b) mm; 80 °C – 2 (c) e 3 (d) mm; 90 °C – 2 (e) e 3 (f) mm por CTD e para o pó liofilizados (g). As setas destacam a presença do óleo nas imagens.	90
Figura 27 - Representação gráfica dos parâmetros L*, a* e b* da escala CIELAB, ângulo Hue e Chroma. A delimitação pelo retângulo vermelho engloba a região em que se encontram os valores dos parâmetros a* e b* dos pós produzidos a partir de todas as condições experimentais estudadas (CTD: 65, 80 e 90 °C – 2 e 3 mm; FD).	96
Figura 28 - Representação gráfica dos parâmetros L*, a* e b* da escala CIELAB, ângulo Hue e Chroma. A delimitação pelo retângulo vermelho engloba a região em que se encontram os valores dos parâmetros a* e b* dos pós produzidos a partir de todas as condições experimentais estudadas (CTD: 65, 80 e 90 °C – 2 e 3 mm; FD); a linha amarela representa a região dos parâmetros de cor das polpas reconstituídas (em relação à umidade e à concentração de sólidos iniciais) e o círculo roxo representa os parâmetros L*, a* e b* da polpa <i>in natura</i>	107
Figura 29 - Imagens obtidas por microscópio óptico das polpas reconstituídas a partir da adição de água destilada na proporção de 1:5 nos pós para as condições de secagem de 65 °C – 2 (a) e 3 (b) mm; 80 °C – 2 (c) e 3 (d) mm; 90 °C – 2 (e) e 3 (f) mm; para o pó liofilizado (g) e da polpa de açaí <i>in natura</i> (h). Aumento de 100 vezes.	109
Figura 30 - Curvas representativas da tensão de cisalhamento vs taxa de deformação para as polpas de açaí reconstituídas até a concentração de sólidos solúveis inicial, a partir dos pós obtidos a 65 °C, 2 (a) e 3 (b) mm; 80 °C, 2 (c) e 3 (d) mm; 90 °C, 2 (e) e 3 (f) mm; em CTD; a partir da polpa reconstituída do pó liofilizado (g) e da matéria-prima (h).	

Ícones Δ , \bullet e \circ representam a primeira subida, a descida e a segunda subida, respectivamente. 111

Figura 31- Triplicatas das curvas de escoamento da polpa reconstituída a partir da secagem em TCD a 65 °C, 2 (a) e 3 (b) mm; 80 °C, 2 (c) e 3 (d) mm e 90 °C, 2 (e) e 3 (f) mm; reconstituída a partir do pó liofilizado (g) e da polpa de açúcar *in natura* (h). Símbolos indicam os dados experimentais e a linha contínua o modelo de Herschel-Bulkley aplicado. 113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalos de tempo para a retirada dos pontos na secagem de polpa de açai em CTD.....	50
Tabela 2 - Análises realizadas com a polpa, o pó e a polpa reconstituída.	55
Tabela 3 – Composição centesimal da polpa de açai (<i>Euterpe oleracea</i>).	64
Tabela 4 – Intervalos dos valores dos parâmetros do modelo exponencial ajustado para as triplicatas experimentais das curvas de secagem da polpa de açai nas temperaturas de 65, 80 e 90 °C nas espessuras do <i>gap</i> de espalhamento sobre o <i>Mylar</i> de 2 e 3 mm.	67
Tabela 5 - Tempo de secagem da região de decaimento linear da umidade.....	69
Tabela 6 - Parâmetros do modelo linear ajustado aos dados de umidade <i>vs</i> tempo de secagem no período linear.....	69
Tabela 7 - Parâmetros do modelo exponencial ajustados aos dados de umidade <i>vs</i> tempo de secagem no período decrescente de secagem..	69
Tabela 8 – Tempo total de secagem (min) definido a partir dos modelos exponencial e de duas fases ajustados para cada condição experimental, considerando o final da secagem o produto com 3 % de umidade em base úmida.	70
Tabela 9 - Taxa constante obtida pela derivada da curva suavizada ajustada pelo modelo de duas fases no período de decaimento linear da umidade <i>vs</i> tempo de secagem.	73
Tabela 10 - Parâmetros do modelo linear ajustado para os dados da capacidade evaporativa <i>vs</i> umidade, determinados pelo modelo exponencial.	79
Tabela 11 - Parâmetros do modelo linear ajustado para os dados da capacidade evaporativa <i>vs</i> umidade, determinados pelo modelo de duas fases.	79
Tabela 12 - Capacidade evaporativa média das condições de 65, 80 e 90 °C nas espessuras de 2 e 3 mm.....	80
Tabela 13 - Fluxo de calor médio estimado por condução e por radiação através do <i>Mylar</i> ; e a contribuição da radiação para a secagem frente ao	

calor total transferido para as condições a 65, 80 e 90 °C nos <i>gaps</i> de espalhamento de 2 e 3 mm.	83
Tabela 14 – Valores estimados para as resistências condutiva e de radiação à transferência de calor através do <i>Mylar</i> considerando a temperatura da interface água- <i>Mylar</i> (T_b) como a temperatura de aquecimento e a temperatura da interface <i>Mylar</i> -polpa (T_i) como a temperatura da polpa.	83
Tabela 15 - Umidade em base úmida e em base seca dos pós produzidos em CTD para as condições de temperatura de aquecimento de 65, 80 e 90 °C e <i>gaps</i> de espalhamento de 2 e 3 mm e do pó obtido por liofilização.....	85
Tabela 16 - Atividade de água dos pós produzidos em CTD para as condições de temperatura de aquecimento de 65, 80 e 90 °C e <i>gaps</i> de espalhamento de 2 e 3 mm e do pó obtido por liofilização.	85
Tabela 17 - Diâmetro de Brouckere - $D[4,3]$ – dos pós produzidos em CTD a partir das condições de 65, 80 e 90 °C nas espessuras de 2 e 3 mm e para o pó liofilizado.....	87
Tabela 18 - Massa específica aparente e real dos pós produzidos em CTD nas temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C e nos <i>gaps</i> de espalhamento de 2 e 3 mm e o do pó liofilizado.	91
Tabela 19 – Porosidade do leito de partículas de pós produzidos em CTD nas temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C e nos <i>gaps</i> de espalhamento de 2 e 3 mm e o do pó liofilizado.	91
Tabela 20 - Solubilidade aparente e tempo de dispersão dos pós em água para os pós de açaí produzidos pelas condições de secagem no CTD a 65, 80 e 90 °C, com <i>gaps</i> de espalhamento de 2 e 3 mm, e do pó liofilizado	93
Tabela 21 - Parâmetros L^* , a^* e b^* da escala de cor CIELAB para os pós produzidos a partir das temperaturas 65, 80 e 90 °C nos <i>gaps</i> de espalhamento de 2 e 3 mm e do pó liofilizado	95
Tabela 22 - Ângulo Hue e chorma para os pós produzidos a partir das temperaturas 65, 80 e 90 °C - nas espessuras de 2 e 3 mm - e do pó liofilizado	95
Tabela 23 - Concentração de compostos fenólicos totais expresso em mg de equivalente do ácido gálico por 100 g de extrato seco para os pós	

produzidos em CTD nas temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C e nos <i>gaps</i> de espalhamento de 2 e 3 mm; para o pó liofilizado e para a polpa <i>in natura</i>	97
Tabela 24 - Antocianinas totais expressas em mg de cianidina-3-glicosídeo por 100 g de extrato seco para os pós obtidos nas temperaturas de aquecimento 65, 80 e 90 °C – <i>gaps</i> de espalhamento de 2 e 3 mm, para o pó liofilizado e para a polpa <i>in natura</i>	98
Tabela 25 - Atividade antioxidante determinada pelos métodos ABTS e DPPH da polpa de açaí e dos pós de açaí obtidos pela secagem em CTD utilizando as temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C - com espalhamento de 2 e 3 mm e no pó liofilizado. Valores expressos em µmol de Trolox equivalente por g de extrato seco.....	100
Tabela 26 – Parâmetros obtidos ao se reidratar os pós produzidos a partir da secagem em CTD nas temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C – nos <i>gaps</i> de espalhamento de 2 e 3 mm; e para o pó liofilizado até próximo da umidade da polpa <i>in natura</i> ($80,97 \pm 0,11$ %).....	102
Tabela 27 - Parâmetros obtidos ao se reidratar os pós produzidos a partir da secagem em CTD nas temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C – nos <i>gaps</i> de espalhamento de 2 e 3 mm e para o pó liofilizado até uma concentração de sólidos solúveis próxima a da polpa <i>in natura</i> ($10,0 \pm 1,2$ °Brix).....	102
Tabela 28 – Parâmetros de cor da escala CIELAB, ângulo Hue e Chroma para a polpa descongelada utilizada como matéria-prima para produção dos pós.....	104
Tabela 29 - Parâmetros de cor da escala CIELAB para as polpas reconstituídas obtidas a partir da adição de água destilada para atingir uma umidade próxima a inicial da polpa de açaí.	105
Tabela 30 - Ângulo Hue e Chroma para as polpas reconstituídas obtidas a partir da adição de água destilada para atingir uma umidade próxima a inicial da polpa de açaí. Diferença de cor (ΔE) entre a polpa reconstituída e a polpa descongelada.	105
Tabela 31 - Parâmetros de cor da escala CIELAB para as polpas reconstituídas obtidas a partir da adição de água destilada para atingir uma concentração de sólidos solúveis próxima a inicial da polpa de açaí.	106

Tabela 32 - Ângulo Hue e Chroma para as polpas reconstituídas obtidas a partir da adição de água destilada para atingir uma concentração de sólidos solúveis próxima a inicial da polpa de açaí. Diferença de cor (ΔE) entre a polpa reconstituída e a polpa descongelada.	106
Tabela 33 - Faixa de valores dos parâmetros obtidos do modelo de Herschel-Bulkley ajustado para as triplicatas das curvas de escoamento para a polpa de açaí e para as polpas de açaí reconstituídas a partir dos pós obtidos nas secagem em CTD a 65, 80 e 90 °C - 2 e 3 mm - e liofilizado.	115

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Sigla	Denominação	Unidade
A	Diferença entre as absorvâncias a 520 e 700 nm	-
A _{amostra}	Absorvância da amostra	-
A _{controle}	Absorvância da amostra controle	-
A ₅₂₀	Absorvância a 520 nm	-
A ₇₀₀	Absorvância a 700 nm	-
ABTS	2,2'-azinobis – (3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)	-
a _w	Atividade de água	-
a*	Cromaticidade de a*	-
b*	Cromaticidade de b*	-
BF	<i>Mylar</i> recoberto com tinta preta	-
b.s.	Base seca	g g ⁻¹
b.u.	Base úmida	%
C	Concentração de antocianinas	mg L ⁻¹
CE	Capacidade evaporativa	kg de água evaporada m ⁻² h ⁻¹
CTD	<i>Cast Tape Drying</i>	-
cy	Cianidina-3-glicosídeo	-
b.s.	Base seca	g g ⁻¹
DPPH	2,2 – difenil – 1- picrilhidrazil	-
FD	Liofilização (“freeze-drying”)	-
Fd	Fator de diluição	-
GAE	Ácido gálico equivalente	-
h	Coefficiente de transferência convectiva de calor	W m ⁻² K ⁻¹
h _a	Coefficiente de transferência convectiva de calor entre a polpa e o ar de secagem	W m ⁻² K ⁻¹
h _r	Coefficiente de transferência de calor de radiação	W m ⁻² K ⁻¹
h _w	Coefficiente de transferência convectiva de calor entre a água e o	W m ⁻² K ⁻¹
	<i>Mylar</i>	
k	Condutividade térmica	W m ⁻¹ K ⁻¹
K	Índice de consistência	Pa s ⁿ
k _{ef}	Condutividade efetiva	K W ⁻¹ m ⁻¹

k_m	Condutividade térmica do <i>Mylar</i>	$W m^{-1} K^{-1}$
L	Espessura	m
L_m	Espessura do <i>Mylar</i>	mm
L_p	Espessura da Polpa	mm
L^*	Luminosidade	-
M	Massa molar da cianidina-3-glicosídica	$26900 L mol^{-1} cm^{-1}$
m_{am}	Massa de amostra	g
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e de Abastecimento	-
MEV	Microscopia eletrônica de varredura	-
m_f	Massa de sólidos secos	g
MO	Microscopia óptica	-
\dot{m}_v	Taxa de evaporação	$kg s^{-1}$
m_0	Massa inicial da amostra	g
m_1	Massa de amostra remanescente no papel filtro	g
n	Índice de comportamento do fluido	-
pH	Potencial hidrogeniônico	-
P_1	Pressão inicial	$kg cm^{-2}$
P_2	Pressão final	$kg cm^{-2}$
q	Taxa de secagem	$kg kg^{-1} min^{-1}$
q_a	Taxa de transferência de calor no ar	W
q_{cond}	Fluxo de calor condutivo	$W m^{-2}$
q_{conv}	Fluxo de calor convectivo	$W m^{-2}$
q_m	Taxa de transferência de calor no <i>Mylar</i>	W
q_p	Taxa de transferência de calor na polpa	W
q_{rad}	Fluxo de calor de radiação	$W m^{-2}$
q_w	Taxa de transferência de calor na água	W
R_a	Resistência convectiva entre a superfície da polpa e o ar	$K W^{-1}$
R_m	Resistência condutiva e de radiação em paralelo no <i>Mylar</i>	$K W^{-1}$
$R_{m,k}$	Resistência condutiva no <i>Mylar</i>	$m^2 K W^{-1}$
$R_{m,r}$	Resistência à radiação no <i>Mylar</i>	$m^2 K W^{-1}$
R_p	Resistência condutiva e convectiva natural na polpa	$K W^{-1}$

$R_{p,k}$	Resistência condutiva na polpa	$m^2 K W^{-1}$
$R_{p,c}$	Resistência convectiva natural na polpa	$m^2 K W^{-1}$
RW	<i>Refractance Window</i>	-
R_w	Resistência convectiva entre a água e o Mylar	$K W^{-1}$
SOL	Solubilidade aparente	%
t	Tempo	min
T	Temperatura	K
T_a	Temperatura do ar	K
$T_{água}$	Temperatura da água	K
T_b	Temperatura na interface Mylar-água	K
TE	Trolox equivalente	-
T_i	Temperatura na interface polpa-Mylar	K
T_{polpa}	Temperatura da polpa	K
T_s	Temperatura da superfície	K
T_u	Temperatura na interface polpa-ar	K
T_w	Temperatura da água	K
T_{viz}	Temperatura da vizinhança	K
$U_{B,U}$	Umidade inicial do pó	%
V_{am}	Volume da amostra	cm^3
V_{cap}	Volume da cápsula	cm^3
V_{exp}	Volume de expansão	cm^3
X	Umidade em base seca	$g g^{-1}$
$X_{B,U}$	Umidade inicial da polpa	-
X_c	Umidade crítica	$g g^{-1}$
X_{eq}	Umidade de equilíbrio	$g g^{-1}$
X_f	Umidade final do produto	$kg kg^{-1}$
X_i	Umidade inicial do produto	$kg kg^{-1}$
x,y,z	Direção do fluxo	m
ϵ	Emissividade total	-
ρ	Massa específica	$kg m^{-3}$
ρ_{real}	Massa específica real	$g cm^{-3}$
ρ_{ap}	Massa específica aparente	$g cm^{-3}$
ΔE	Diferença de cor entre as amostras reconstituídas e a polpa	-
Δt	Tempo total de secagem	h
θ	Porosidade do leito	-
σ	Tensão de cisalhamento	Pa

σ_{BOL}	Constante de Stefan-Boltzmann	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
σ_0	Tensão de cisalhamento inicial	Pa
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação	s^{-1}

SUMÁRIO

DIAGRAMA CONCEITUAL.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	29
OBJETIVO GERAL	31
<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>31</i>
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
2.1 AÇAÍ (<i>EUTERPE OLERACEA</i>)	32
2.2 SECAGEM DE ALIMENTOS.....	34
2.2.1 <i>Métodos de secagem por espalhamento</i>	<i>36</i>
2.2.1.1 Tape-casting	37
2.2.1.2 Refractance Window (RW)	37
2.2.1.2.1 Mecanismos de Transferência de Calor e de Massa em RW	38
2.2.1.2.2 Aplicações do RW	44
2.3 ALIMENTOS EM PÓ.....	44
2.3.1 <i>Reidratação de pós</i>	<i>45</i>
3. MATERIAL E MÉTODOS	48
3.1 AMOSTRAS.....	48
3.2 CARACTERIZAÇÃO CENTESIMAL DO AÇAÍ	49
3.3 APARATO EXPERIMENTAL	49
3.4 SECAGEM DA POLPA DE AÇAÍ EM CTD	50
3.5 LIOFILIZAÇÃO.....	54
3.6 MOAGEM E CLASSIFICAÇÃO DO PÓ.....	54
3.7 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS	55
3.7.1 <i>Umidade.....</i>	<i>55</i>
3.7.2 <i>Atividade de água (a_w).....</i>	<i>56</i>
3.7.3 <i>Cor.....</i>	<i>56</i>
3.7.4 <i>Microscopia Óptica</i>	<i>56</i>
3.8 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO PÓ.....	57
3.8.1 <i>Solubilidade Aparente</i>	<i>57</i>
3.8.2 <i>Tempo de Dispersão</i>	<i>57</i>
3.8.3 <i>Massa Específica e Porosidade do Leito de Partículas.....</i>	<i>58</i>

3.8.4	<i>Distribuição do Tamanho das Partículas</i>	59
3.8.5	<i>Morfologia do Pó</i>	59
3.9	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO PÓ	59
3.9.1	<i>Preparação dos Extratos</i>	60
3.9.2	<i>Determinação dos compostos fenólicos totais</i>	60
3.9.3	<i>Determinação das antocianinas totais</i>	60
3.9.4	<i>Determinação da atividade antioxidante</i>	61
	Captura do radical livre ABTS	61
	Captura do radical livre DPPH	62
3.10	CARACTERIZAÇÃO DAS POLPAS RECONSTITUÍDAS ...	62
3.10.1	<i>Sólidos Solúveis</i>	62
3.10.2	<i>Potencial Hidrogeniônico (pH)</i>	62
3.10.3	<i>Comportamento Reológico</i>	62
3.11	ANÁLISE ESTATÍSTICA	63
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO AÇAÍ	64
4.2	EVOLUÇÃO TEMPORAL DA UMIDADE, TAXAS DE SECAGEM E CAPACIDADE EVAPORATIVA	65
	<i>Evolução temporal da umidade</i>	65
	<i>Taxas de Secagem</i>	71
	<i>Capacidade Evaporativa (CE)</i>	78
4.3	EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA	81
4.4	FLUXO DE CALOR	82
4.5	CARACTERIZAÇÃO DOS PÓS	84
4.5.1	<i>Umidade e atividade de água</i>	84
4.5.2	<i>Distribuição do tamanho de partículas</i>	86
4.5.3	<i>Microestrutura dos pós</i>	87
4.5.4	<i>Massa específica e porosidade</i>	91
4.5.5	<i>Solubilidade aparente e tempo de dispersão</i>	92
4.5.6	<i>Cor</i>	94
4.5.7	<i>Compostos Fenólicos e Antocianinas Totais</i>	97
4.5.8	<i>Atividade Antioxidante</i>	100
4.6	CARACTERIZAÇÃO DOS PÓS REIDRATADOS	101
4.6.1	<i>Umidade, atividade de água, sólidos solúveis e pH</i>	101

4.6.2 Cor.....	104
4.6.3 Microscopia Óptica (MO)	109
4.6.4 Comportamento Reológico	110
5. CONCLUSÃO.....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
ANEXO A	131
ANEXO B	132
ANEXO C	133
ANEXO D.....	141
ANEXO E	142

DIAGRAMA CONCEITUAL

O quê?

Estudo do efeito da temperatura de aquecimento e da espessura do espalhamento da polpa de açaí na secagem de filme líquido sobre suporte e na caracterização físico-química do produto obtido em forma de pó e da polpa reconstituída.

Por quê?

Pó de açaí

- Fruta de destaque nacional e internacional pelos benefícios à saúde associados ao seu consumo devido à sua composição com elevado conteúdo polifenólico;
- Questões sociais e ambientais por ser um produto de extrativismo vegetal com possibilidade de aumento da renda da população local e redução da derrubada da palmeira para obtenção do palmito pela agregação de valor à fruta.
- Estabilidade microbiológica pela redução da umidade e atividade de água por meio do processamento;
- Redução de custos associados ao transporte e armazenamento do produto, uma vez que pela elevada perecibilidade é usualmente vendida na forma de polpa congelada.

Cast-Tape Drying

- Utilização de temperaturas moderadas na secagem, o que possibilita a secagem de alimentos que apresentam componentes termossensíveis;
- Apresentar curtos tempos de secagem em relação ao processo de liofilização;
- Não ser necessário o emprego de agentes carreadores como a maltodextrina para a secagem.

O que já foi feito?

- Estudos de secagem de polpa de açaí em *spray-drying* com adição de diferentes agentes carreadores e condições de processo;

- Caracterização físico-química dos pós de açaí obtidos por secagem em *spray-drying*;
- Estudo de secagem de polpa de açaí por liofilização, *Refractance Window* e secagem convectiva com ar aquecido;
- Estudo a respeito da secagem de diferentes polpas e purês de alimentos em RW e quantificação dos mecanismos de transferência de calor em RW.

Hipóteses

- É possível produzir açaí em pó utilizando *Cast-Tape Drying* sem a adição de agentes carreadores, como o desenvolvimento de um novo produto a fim de agregar valor a uma fruta de alta perecibilidade e crescente interesse comercial;
- Temperaturas elevadas aumentam a degradação dos compostos termossensíveis como os compostos fenólicos e antocianinas totais no açaí e reduzem o tempo de secagem;
- Temperaturas mais baixas minimizam a alteração estrutural do produto, de forma a garantir melhores propriedades de reidratação e reológica.

Quais as etapas?

- Caracterização da polpa de açaí tipo A quanto à: i) composição centesimal; ii) concentração de sólidos solúveis; iii) atividade de água; iv) pH; v) cor; vi) microscopia óptica; vii) compostos fenólicos e antocianinas totais; viii) atividade antioxidante; ix) comportamento reológico.
- Secagem de polpa de açaí tipo A por *Cast-Tape Drying* usando como meio de aquecimento água aquecida.
- Variação no CTD das condições de temperatura (65, 80 e 90 °C) da fonte de aquecimento e de espessura do filme de açaí (2 e 3 mm).
- Produção de pó de açaí a partir da moagem em moinho de facas dos flocos obtidos pela secagem em CTD e por liofilização (FD).
- Caracterização do pó de açaí obtido por CTD e FD quanto à: i) umidade; ii) atividade de água; iii) cor; iv) distribuição do tamanho de partículas; v) microestrutura; vi) massa específica e porosidade; vii) solubilidade aparente; viii) tempo de dispersão; ix) compostos fenólicos e antocianinas totais; x) atividade antioxidante.

- Reconstituição das polpas a partir da adição de água destilada nos pós produzidos por CTD e liofilização até atingir a umidade e a concentração de sólidos solúveis da matéria-prima.
- Caracterização das polpas reconstituídas quanto à: i) umidade; ii) atividade de água; iii) concentração de sólidos solúveis; iv) pH; v) cor; vi) microscopia óptica; vii) comportamento reológico.

Quais os resultados esperados?

- Tempo, taxa de secagem e capacidade evaporativa para cada condição aplicada.
- Evolução temporal da umidade e da temperatura da polpa de açaí durante a secagem.
- Para a polpa de açaí: umidade, atividade de água, cor, concentração de sólidos solúveis, pH, microscopia óptica, compostos fenólicos e antocianinas totais, atividade antioxidante e comportamento reológico.
- Para os pós obtidos por CTD e liofilização: umidade, atividade de água, cor, microestrutura e morfologia, solubilidade aparente, tempo de dispersão, massa específica e porosidade do leito, distribuição do tamanho das partículas, compostos fenólicos e antocianinas totais, atividade antioxidante.
- Para as polpas reconstituídas: umidade, atividade de água, concentração de sólidos solúveis, pH, cor, microestrutura e comportamento reológico.

ESTADO DA ARTE

Diferentes processos – como *spray-drying*, liofilização, secagem convectiva, secagem condutiva ou de micro-ondas com/sem pulsos de vácuo e secagem condutiva por espalhamento - são comumente estudados no laboratório de Propriedades Físicas dos Alimentos na Universidade Federal de Santa Catarina para a produção de filmes biodegradáveis e frutas secas ou em pó.

Juntamente com a produção e caracterização físico-química dos produtos existe o estudo relacionado aos fenômenos de transferência de calor e de massa durante o processamento.

Os seguintes trabalhos publicados em revistas internacionais nos últimos anos demonstram a importância da produção científica que está sendo desenvolvida no laboratório.

- CASTOLDI et al. Production of Tomato Powder by Refractance Window Drying. **Drying Technology: An International Journal**, vol. 33, p. 1463-1473, 2015.

- MONTEIRO et al. How to make a microwave vacuum dryer with turntable. **Journal of Food Engineering**, vol. 166, p. 276-284, 2015.

- MORAES et al. Conductive drying of starch-fiber films prepared by tape casting: Drying rates and film properties. **LWT – Food Science and Technology**, vol. 64, p. 356-366, 2015.

- PORCIUNCULA, B.D.A.; SEGURA, L.A.; LAURINDO, J.B. Processes for controlling the structure and texture of dehydrated banana. **Drying Technology: An International Journal**, julho/ 2015.

- ZOTARELLI, M.F.; CARCIOFI, B.A.M.; LAURINDO, J.B. Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window. **Food Research International**, vol. 69, p. 410-417, 2015.

- ZOTARELLI, M.F.; PORCIUNCULA, B.D.A.; LAURINDO, J.B. A convective multi-flash drying process for production dehydrated crispy fruits. **Journal of Food Engineering**, vol. 108, p. 523-531, 2012.

Além disso, outros trabalhos incluindo os processos de secagem e mecanismos de transferência de calor e de massa também foram apresentados na forma de resumo no Congresso de Engenharia Química, temática Engenharia e Tecnologia de Alimentos em Florianópolis (2014):

- BAMPI, M.; SCHMIDT, F.C.; LAURINDO, J.B. Influência da aplicação de vácuo nos processos de salga de carne bovina.

- DURIGON et al. Estudo da produção de tomate em pó por *refractance window* e por liofilização.

- DURIGON et al. Estudo da desidratação de extrato de café por *refractance window* para a obtenção de café solúvel.
- MONTEIRO, R.L.; CARCIOFI, B.A.M.; LAURINDO, J.B. Ciclos de aquecimento-pulso de vácuo para modificação da textura de bananas desidratadas em campo de micro-ondas.
- PORCIUNCULA, B.D.A.; LAURINDO, J.B. Influência do método de secagem na formação da microestrutura de banana (var. Prata).
- RODRIGUES et al. Estudo do resfriamento de carcaças de frango combinado com ar forçado e imersão em água.
- SOUZA, P.G.; CARCIOFI, B.A.M. Avaliação da desidratação osmótica e impregnação a vácuo associados com a secagem convectiva de abacaxi (var. *Ananas comosus* L.).
- TRIBUZI, G.; LAURINDO, J.B. Evaluation of different dehydration methods of cooked mussels.

Apesar do processo de secagem ser conhecido e utilizado desde a antiguidade para a preservação de alimentos, o estudo das técnicas para a obtenção desses produtos que apresentem qualidade torna-se fundamental para o aumento do consumo e para viabilizar a comercialização desse tipo de produto no mercado externo, gerando ganhos para o país que possui uma economia basicamente envolvida no agronegócio.

Secagem por espalhamento

A secagem por espalhamento pode ser feita sobre diferentes suportes e fontes de aquecimento como exemplificado nos seguintes trabalhos:

- Secagem de polpa de manga sobre *Mylar* (fonte de aquecimento: água quente). ZOTARELLI, M.F.; CARCIOFI, B.A.M.; LAURINDO, J.B. Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by refractance window. **Food Research International**, vol. 69, p. 410-417, 2015.
- Secagem de polpa de manga sobre *Mylar* (fonte de aquecimento: água quente) e sobre cilindros de metal (fonte de aquecimento: vapor). CAPARINO, O.A. et al. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine ‘Carabao’ var.) powder. **Journal of Food Engineering**, vol. 111, p. 135-148, 2012.
- Secagem de polpa de tomate sobre *Mylar* (fonte de aquecimento: água quente). CASTOLDI et al. Production of Tomato Powder by

Refractance Window Drying. **Drying Technology: An International Journal**, vol. 33, p. 1463-1473, 2015.

- Produção de filmes de amido-glicerol-fibras de celulose sobre chapa aquecida (fonte de aquecimento: água quente). MORAES et al. Conductive drying of starch-fiber films prepared by tape casting: Drying rates and film properties. **LWT – Food Science and Technology**, vol. 64, p. 356-366, 2015.

- Secagem de filmes de quitosana sobre placas de vidro (fonte de aquecimento: radiação infravermelha). SRINIVASA et al., Properties of chitosan films prepared under different drying conditions. **Journal of Food Engineering**, vol. 63, p. 79-85, 2004.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa o terceiro lugar no mercado mundial de frutas com uma produção anual superior a 40 milhões de toneladas (SEAB, 2012). Desse montante, apenas 3 % das frutas *in natura* são exportadas em função de problemas na produção, infraestrutura deficiente e barreiras fitossanitárias, enquanto que em relação às frutas processadas, a exportação não atingiu 50 toneladas devido da baixa estruturação das agroindústrias no setor (SECEX, 2006). No entanto, a fruticultura é considerada uma das atividades mais dinâmicas da economia brasileira, de forma a apresentar uma perspectiva otimista para o setor, em função da melhoria do poder aquisitivo da população, disseminação de hábitos saudáveis e sistemas de cultivo e de rastreamento que impulsionam a cadeia exportadora (POLIFER, 2015; REETZ et al., 2015).

O território brasileiro é relativamente grande e medidas de preservação são necessárias para que frutas produzidas em um extremo do país possam ser consumidas em outras regiões, além de possibilitar a exportação dessas sem sofrerem deterioração.

O açaí (*Euterpe oleracea*) está entre as frutas de destaque nacional e internacional, por ser considerada uma “superfruta”, em função da sua composição nutricional, rica em fibras, lipídeos e fenóis, que podem estar relacionados à prevenção de doenças (YAMAGUCHI et al., 2015).

Além do interesse econômico, o processamento do açaí pode permitir ganhos em termos sociais e ambientais para o Brasil pelo fato da fruta ser produto de extrativismo, o que viabiliza a aplicação da Política de Garantia de Preços Mínimos (MAPA, 2008), gerando renda à população e por estimular a preservação da mata nativa, em função do incentivo à conservação dos açaizeiros sem a derrubada da palmeira para a retirada do palmito (CONAB, 2014).

No entanto, esse fruto apresenta alta perecibilidade, sendo necessário desenvolver técnicas que permitam seu processamento, de forma a manter suas propriedades nutricionais e físico-químicas, além de permitir seu consumo em localidades afastadas da região produtora.

Nesse contexto surge a possibilidade de desenvolver um produto a partir da polpa de açaí que seja microbiologicamente estável, com características sensoriais e físico-químicas similares à matéria-prima, e que possa apresentar vantagens comerciais. Logo, optou-se pela produção de açaí em pó por garantir redução de custos com transporte e

armazenamento – uma vez que nesse caso o açaí não necessita ser refrigerado e apresenta menor volume – e permitir a obtenção de um produto com características sensoriais similares à polpa, ao ser reidratado.

Os processos mais conhecidos para produção de pó são aqueles relacionados com métodos de secagem com uso de calor ou a liofilização. Um dos obstáculos para a exportação do açaí é a barreira fitossanitária em função da ocorrência da contaminação da polpa pelo protozoário *Trypanosoma cruzi*, causador da doença de Chagas, decorrente da falta de assepsia no processamento. Esse microrganismo pode sobreviver em temperatura ambiente até temperatura de congelamento (-20 °C); e sendo assim surge o interesse de aplicação de métodos que empregam o calor para secagem, apesar da desvantagem da utilização de energia térmica para produtos termossensíveis como as antocianinas do açaí, que poderiam acarretar a redução da sua atividade antioxidante (REETZ et al., 2015; FIOCRUZ, 2010; DIAS, 2006).

Os métodos de secagem mais difundidos para obtenção de alimentos em pó são secagem em tambor (*drum dryer*), *spray drying* e liofilização (FD) (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2005). No entanto, métodos de espalhamento, como é o caso do *Refractance Window* (RW), também podem ser utilizados. Entre essas opções, a FD se apresenta como o processo que resulta em produtos com melhores características em relação à matéria-prima em função da ausência da aplicação de calor, que garante a manutenção da estrutura e da composição nutricional do produto. Apesar dessas vantagens, a taxa de secagem é baixa e o custo de operação elevado devido à necessidade da aplicação de vácuo e do congelamento (NAKAGAWA; OCHIAI, 2015).

A secagem em tambor deve ser utilizada especificamente para produtos líquidos agrícolas, que devem apresentar certa viscosidade para permitir a aderência da suspensão à superfície do secador. Os produtos obtidos são porosos e de alta qualidade, no entanto podem apresentar escurecimento (SETYADJIT; SUKASIH, 2015).

O *spray-drying* apresenta reprodutibilidade, baixo tempo de secagem (segundos) e a possibilidade de secar produtos termossensíveis (SOSNIK; SEREMETA, 2015; BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2005), no entanto a baixa eficiência térmica e a elevada perda de voláteis - em função da temperatura usual utilizada ser superior à 130 °C - podem ser considerados alguns inconvenientes da utilização desse método.

Nesse cenário, a secagem por RW se apresenta como uma boa alternativa para a aplicação em polpas e purês de frutas e vegetais, uma

vez que a matéria-prima atinge temperaturas moderadas (na faixa entre 70-75 °C), e apresenta curtos tempos de secagem (escala de minutos) em relação à liofilização com reduzido valor de operação, de forma a permitir a obtenção de produtos com valores mais acessíveis.

Apesar do RW ser considerado um processo que utiliza os três mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação) para a secagem, Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) e Ortiz-Jerez et al. (2015) comprovaram que a contribuição térmica pela radiação pode ser desprezada, de forma que RW deve ser considerado uma secagem condutiva semelhante ao processo de *tape-casting*, que consiste em uma secagem por espalhamento sobre chapa aquecida, podendo então ser denominado de *Cast-Tape Drying* (CTD).

Objetivo Geral

No contexto apresentado deseja-se investigar a secagem da polpa de açaí por CTD para a produção de pós, verificando a influência da temperatura de aquecimento e da espessura do espalhamento da polpa na cinética de secagem e nas propriedades físico-químicas do produto obtido.

Objetivos Específicos

- Avaliar a cinética de secagem da polpa de açaí em três valores da temperatura da água de aquecimento: 65, 80 e 90 °C e em duas espessuras de espalhamento 2 e 3 mm;
- Caracterizar físico-quimicamente os pós de açaí obtidos pelas diferentes condições aplicadas no CTD e por liofilização;
- Verificar a influência da temperatura da fonte quente e da espessura do espalhamento na quantificação dos compostos fenólicos e antocianinas totais e na atividade antioxidante do pó de açaí produzido;
- Investigar a influência das distintas condições de processo na caracterização física das polpas de açaí reconstituídas;
- Avaliar o comportamento reológico do fluido frente à taxa de deformação da matéria-prima e das polpas de açaí reconstituídas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇAÍ (*Euterpe oleracea*)

O açaí é originário de uma palmeira nativa pertencente à família Arecaceae – composta por cerca de 2500 espécies (MIGUEL; SILVA; DUQUE, 2007) – e gênero *Euterpe*, classificado de acordo com a espécie em *Euterpe catinga* Wallace, *Euterpe espiritosantensis* Fernandes, *Euterpe precatoria* Martius, *Euterpe oleracea* Martius e *Euterpe edulis* Martius (LORENZI et al., 1996).

A *Euterpe oleracea* Martius ocorre em terrenos alagados e várzeas úmidas, como o estuário do rio Amazonas, sendo comum nos Estados do Pará (55 %), Amazonas (35 %), Maranhão (6 %), Acre (2 %), Amapá (1 %) e Rondônia (1 %) (IBGE, 2013; LORENZI et al., 1996). A palmeira é considerada de grande importância econômica, cultural e social do Norte do Brasil (QUEIROZ; MELÉM, 2001), por ser o alimento funcional mais popular dessa região (REETZ et al., 2015; YAMAGUCHI et al., 2015), podendo ser utilizada para a obtenção do açaí e do palmito (LORENZI, et al., 1996).

O açazeiro floresce durante todo o ano, com pico durante a estação chuvosa que consiste no período entre fevereiro e maio, e frutifica na estação seca entre julho e dezembro, apresentando maior produtividade nos meses de setembro e outubro. Os frutos são arredondados com diâmetro de 1-1,5 cm, com coloração roxa-escuro quando maduros, um mesocarpo polposo de 1 mm de espessura e um endocarpo fibroso (DEL POZO-INSFRAN; BRENES; TALCOTT, 2004; HENDERSON; GALEANO, 1996). A parte comestível do fruto representa em média 26,54 % da sua massa (OLIVEIRA; NETO; PENA, 2007), enquanto que a semente compõe a maior parte da fruta (DEL POZO-INSFRAN; BRENES; TALCOTT, 2004).

O açaí é uma fruta altamente perecível devido às condições ambientais desfavoráveis – temperatura e umidade relativa elevadas -, e falta de assepsia no manuseio que favorecem a proliferação de microrganismos e reações enzimáticas responsáveis pela deterioração do açaí. Sendo assim, a fruta deve ser despulpada dentro de 24 h após a coleta e, mesmo se mantida refrigerada, possui uma vida útil máxima de 12 h, sendo então necessário submetê-lo a processamentos ou ao congelamento (TONON et al., 2009; MAPA, 2007; MENEZES, 2005).

Usualmente, o açaí é comercializado na forma de polpa com a adição de água, resultando em um produto de cor roxa, com uma aparência superficial oleosa e sabor exótico (PACHECO-PALENCIA; DUNCAN; TALCOTT, 2009). A Figura 1 apresenta as etapas utilizadas para a fabricação da polpa.

Figura 1 - Fluxograma com as etapas de fabricação da polpa de açaí congelada.



Fonte: MAPA, 2007.

Na etapa de recepção e pesagem os frutos devem ser apresentados na temperatura ambiente e protegidos da luz direta, em boas condições de higiene, sendo desprovidos de sujeiras e parasitas. Após a pesagem, ocorre a sanitização com água clorada por 40 min para limpeza e amolecimento da polpa, com descarte de possíveis sujidades remanescentes e frutos danificados. Em seguida, os frutos são lavados com água potável a fim de retirar todo o resquício da solução de limpeza. Após a drenagem da água de enxágue, o açaí é levado à despoldadeiras mecânicas com adição de água potável para a formação da emulsão, que é filtrada - para retirada de resíduos como cascas e caroços - e homogeneizada. Após esse processo, a polpa é envasada e

congelada entre -18 e -25 °C por um período de 24 a 36 h, seguindo para o armazenamento em câmara fria na mesma faixa de temperatura (MAPA, 2007).

A classificação da polpa de açaí depende da quantidade de água adicionada na despoldadeira, sendo dividida em tipo A (acima de 14 % de sólidos totais), tipo B (entre 11 e 14 % de sólidos totais) e tipo C (entre 8 e 11 % de sólidos totais).

O açaí tem sido destaque nos últimos anos em função de ser considerada uma “superfruta”, pela presença de componentes polifenólicos com propriedades antioxidantes - que estão associadas a atividades antioxidante, anti-inflamatória e prevenção de doenças cardiovasculares – superiores a diversas frutas como mirtilo, morango, framboesa, amora, “cranberry” e uva (YAMAGUCHI et al., 2015; PACHECO-PALENCIA; HAWKEN; TALCOTT, 2007a; DEL POZO-INSFRAN; BRENES; TALCOTT, 2004; WROLSTAD, 2004; WANG; CAO; PRIOR, 1997). No entanto, segundo Yamaguchi et al. (2015) as atividades biológicas reportadas para a polpa de açaí não ocorrem exclusivamente pelas substâncias fenólicas.

Nascimento et al. (2008) reportou que a composição da fração lipídica é composta por 71 % de ácidos graxos insaturados, 60,1 % de monoinsaturados e 10,36 % de poliinsaturados; o que contribui para a prevenção de doenças cardiovasculares (YAMAGUCHI et al., 2015). Segundo Yamaguchi et al. (2015) os maiores constituintes do açaí – em matéria seca – são os lipídeos (50 %), fibras (25 %) e proteínas (10 %), sendo que devido ao elevado teor de lipídeos a polpa apresenta alto valor calórico. Os principais ácidos graxos mono e poli-insaturados presentes no açaí são ácidos linoleico, oleico e palmítico (SCHAUSS et al., 2006)

A polpa de açaí apresenta um elevado potencial econômico em função da possibilidade de preparar bebidas que são exportadas em todo o mundo como um apelo energético e nutricional, além de apresentar um sabor exótico (YAMAGUCHI et al., 2015; PACHECO-PALENCIA; HAWKEN; TALCOTT, 2007a).

2.2 SECAGEM DE ALIMENTOS

Normalmente, a palavra secagem é utilizada para descrever processos que envolvem a remoção de água de uma matriz. No entanto, a retirada de umidade pode ser associada tanto à aplicação de vácuo quanto ao uso de calor, por isso esse termo é mais adequadamente

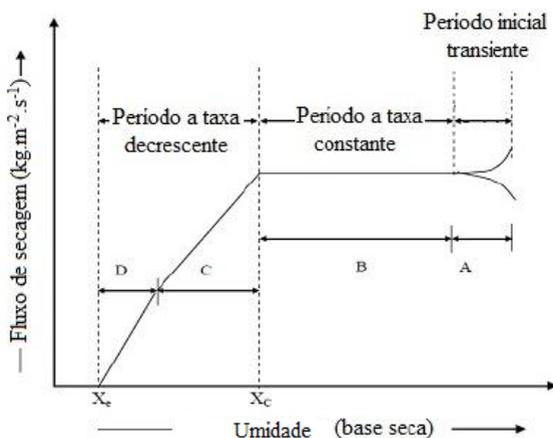
definido como a remoção de substâncias voláteis de uma mistura a partir da aplicação de um gradiente de temperatura positivo, resultando em um produto mais concentrado (KEEY, 1975). O termo secagem está associado à transferência de um líquido que se encontra em uma matriz sólida úmida para uma fase gasosa não saturada (FOUST et al., 1982).

A secagem é uma das principais operações unitárias disseminada para conservação de alimentos. As razões para sua utilização incluem fatores econômicos no transporte e armazenamento menos onerosos (KEEY, 1975) e físico-químicos com a redução no crescimento microbiano e na velocidade das reações químicas (VEGA-MERCADO; GÓNGORA-NIETO; BARBOSA-CÁNOVAS, 2001).

Nesse processo ocorre a transferência de calor e de massa simultaneamente (FOUST et al., 1982), sendo influenciado pelas condições externas ao sistema e pela estrutura interna do material, que atuam de modo diferente em cada período da secagem (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

Ao se considerar a secagem de um sólido úmido pela utilização de ar aquecido com temperatura e umidade determinadas, o comportamento da curva típica da taxa de secagem pode ser observada pela Figura 2.

Figura 2 - Curva típica da taxa de secagem em condições constantes de processo.



Fonte. Adaptado de JANGAM; LAW; MUJUMDAR (2010).

A curva representada na Figura 2 apresenta três períodos de secagem característicos. Inicialmente – período A – ocorre o

ajustamento da temperatura do sólido até que o material atinja a temperatura de bulbo úmido do gás de secagem. Em seguida – período B - a secagem passa por um período de taxa constante, aonde se considera que a superfície do sólido em contato com o ar de secagem está saturada de água livre, de forma que a evaporação do líquido ocorre sem a interferência da composição e estrutura do material. Alguns produtos agrícolas não apresentam o período de taxa constante, em função da taxa com que a água se torna disponível para a evaporação ser determinada pelos mecanismos de transferência de calor e de massa internos (JANGAM; LAW; MUJUMDAR, 2010; PARK; YADO; BROD, 2001; GEANKOPLIS, 1993; STRUMILLO e KUDRA, 1986; FOUST et al., 1982).

O período em que a taxa de secagem é decrescente se inicia no momento em que o sólido atinge a umidade crítica (X_C) e ocorre devido a limitações ao transporte interno da água até a superfície exposta ao ar de secagem, de forma que a consideração da saturação da superfície com água deixa de ser válida. Nessa fase a temperatura do sólido aumenta gradualmente até se estabilizar com a temperatura do ar de secagem, em função da migração da água para a superfície exposta não ser suficiente para manter a pressão de vapor de saturação na interface sólido-gás (JANGAM; LAW; MUJUMDAR, 2010; PARK; YADO; BROD, 2001; GEANKOPLIS, 1993; STRUMILLO e KUDRA, 1986; FOUST et al., 1982).

O final da secagem ocorre quando a matriz sólida atinge a umidade de equilíbrio (X_{eq}), que consiste no teor de água mais baixo que o sólido pode apresentar nas condições de secagem a que está submetido (JANGAM; LAW; MUJUMDAR, 2010; PARK; YADO; BROD, 2001; GEANKOPLIS, 1993; STRUMILLO e KUDRA, 1986; FOUST et al., 1982).

2.2.1 Métodos de secagem por espalhamento

Apesar das técnicas convencionais empregadas para a secagem de alimentos como *drum-drying*, *spray-drying* e liofilização, as secagens por espalhamento como *tape-casting* também são consideradas uma alternativa viável para a produção de flocos ou pós em função dos diferentes métodos de aquecimento que podem ser aplicados.

2.2.1.1 *Tape-casting*

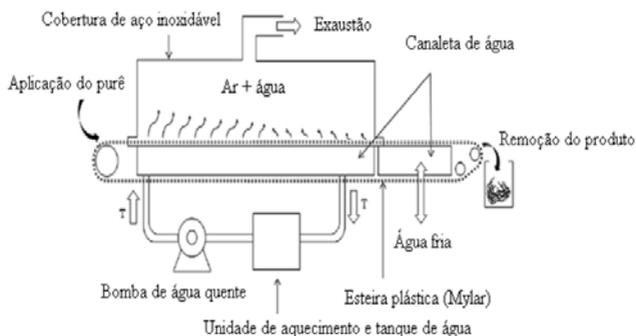
O processo denominado de *tape-casting* (método “doctor’s blade”) consiste no espalhamento de um substrato sobre uma superfície aquecida, de forma que após a evaporação do solvente obtenha-se um filme flexível. Amplamente utilizado para produção de cerâmicas e filmes poliméricos é necessário que a matéria-prima apresente alto teor de sólidos e baixa viscosidade (0,1-100 P) para formar filmes com microestrutura homogênea e de alta densidade (YU et al., 2015; MORAES, 2013; KISAND et al., 2007; HOTZA, 1997; HOTZA; GREIL, 1995).

2.2.1.2 *Refractance Window (RW)*

O *Refractance Window* é um equipamento desenvolvido pela MCD Technologies, Inc. (Tacoma, Washington, E.U.A.) (ABONYI et al., 2002), que utiliza os três mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação (CLARKE, 2004), para secagem ou concentração de alimentos líquidos e purês (NINDO et al., 2003).

O equipamento – representado pela Figura 3 - consiste de um fino filme de poliéster ou de outro material transparente a radiação infravermelha – aproximadamente 0,2 mm - sobre um reservatório em que circula água aquecida, sobre o qual é espalhado o alimento a ser seco (ORTIZ-JEREZ; OCHOA-MARTÍNEZ, 2015; NINDO; POWERS; TANG, 2007; NINDO et al., 2003). Esse sistema pode operar em batelada ou continuamente e apresenta um valor de mercado entre um terço à metade de um liofilizador e com um custo de manutenção e operação inferior à metade (NINDO; TANG, 2007).

Figura 3 - Representação esquemática de um *Refractance Window* contínuo.



Fonte: Adaptado de NINDO et al., 2003.

A energia térmica proveniente da água aquecida é transmitida através do *Mylar* pela condução e pela radiação, onde a transmissão da energia infravermelha é maior quando a superfície plástica está em contato com a água em um lado e com o material úmido no outro (NINDO; TANG, 2007). Segundo Ortiz-Jerez et al. (2015) quando o produto com alta umidade – aproximadamente 90 % - é espalhado sobre o poliéster, o índice de refração entre a água e o alimento se tornam mais próximos, reduzindo a reflexão na interface e aumentando a transmissividade da energia radiante para o produto. Sendo assim, com a redução do teor de água do alimento ao longo da secagem, o índice de refração do *Mylar* aumenta de forma que a maior parte da radiação térmica seja refletida para água, impedindo a atuação desse mecanismo de transferência de calor com o fechamento da “janela” de refractância. Isso minimiza os danos térmicos ao produto, em função do filme de poliéster ser considerado um baixo condutor de calor ($k = 0,15-0,24 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). (ORTIZ-JEREZ et al., 2015; CLARKE, 2004).

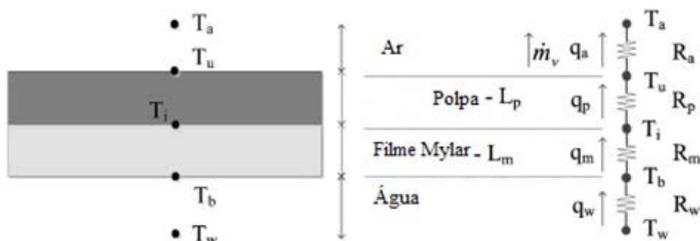
Segundo Nindo, Powers e Tang (2007) a transmissão da energia de radiação é importante por permitir uma rápida evaporação a baixas temperaturas.

2.2.1.2.1 Mecanismos de Transferência de Calor e de Massa em RW

O RW apresenta quatro resistências à transferência de calor em série como representado pela Figura 4. A primeira consiste na resistência convectiva (R_w) entre a água e filme plástico (*Mylar*), seguida pelas resistências condutiva e radiativa em paralelo (R_m) no

Mylar. A terceira resistência ocorre na polpa e também inclui duas resistências em paralelo (R_p), a condutiva e a convectiva natural, sendo essa em função da formação de vapores durante a secagem. A última resistência se refere à transferência convectiva (R_a) entre a superfície da polpa e o ar (ZOTARELLI; CARCIOFI; LAURINDO, 2015).

Figura 4 - Representação esquemática do circuito térmico no *Refractance Window*, onde T são as temperaturas – sendo que os índices são referentes à água (w), a interface água-Mylar (b), a interface Mylar-polpa (i), interface polpa-ar (u) e a do ar (a) -; L_m e L_p são as espessuras do Mylar e da polpa, respectivamente; e q é a taxa de transferência de calor – índices são referentes à transferência entre a água aquecida e a superfície do Mylar (w); através do Mylar (m); através da polpa (p) e entre a superfície da polpa e o ar (a). A taxa de evaporação é representada por \dot{m}_v .



Fonte: Adaptado de ZOTARELLI; CARCIOFI; LAURINDO, 2015.

A resistência convectiva entre a água aquecida e a superfície inferior do *Mylar* (R_w) pode ser calculada pela Equação 1.

$$R_w = \frac{1}{h_w} \quad (1)$$

onde h_w é o coeficiente de transferência convectiva de entre a água e o *Mylar* ($W m^{-2} K^{-1}$).

A resistência equivalente (R_m) às transferências de calor condutiva e de radiação que ocorrem em paralelo através do filme de poliéster pode ser calculada pela Equação 2.

$$R_m = \left(\frac{1}{R_{m,k}} + \frac{1}{R_{m,r}} \right)^{-1} \quad (2)$$

onde $R_{m,k} = L_m/k_m$ consiste na resistência condutiva no *Mylar* ($L_m = 2,5 \cdot 10^{-4}$ m e $k_m = 0,15$ W m⁻¹ K⁻¹, que são a espessura e a condutividade térmica do filme de poliéster, respectivamente); e $R_{m,r} = 1/h_r$ é a resistência à radiação no *Mylar*, sendo h_r o coeficiente de transferência de calor de radiação e que pode ser calculado por $h_r = \varepsilon \sigma_{\text{BOL}} (T_b + T_i) (T_b^2 + T_i^2)$, onde ε é a emissividade e σ consiste na constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma_{\text{BOL}} = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W m⁻² K⁻⁴).

A transferência de calor na polpa ocorre por condução e convecção natural em paralelo, o que resulta em uma resistência térmica equivalente (R_p) que pode ser calculada utilizando a Equação 3.

$$R_p = \left(\frac{1}{R_{p,k}} + \frac{1}{R_{p,c}} \right)^{-1} = \frac{L_p}{k_{ef}} \quad (3)$$

onde $R_{p,k}$ é a resistência condutiva e $R_{p,c}$ é a resistência convectiva ambas na polpa. L_p é a espessura da polpa espalhada e k_{ef} é a condutividade efetiva de transferência de calor através da polpa.

A resistência térmica convectiva entre a superfície da polpa e o ar de secagem (R_a) pode ser determinada pela Equação 4.

$$R_a = \frac{1}{h_a} \quad (4)$$

onde h_a é o coeficiente convectivo de transferência de calor entre a polpa e o ar.

Segundo Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) não é possível calcular a resistência global do sistema, devido os valores de R_w , R_p e R_a serem desconhecidos, no entanto as resistências no *Mylar* podem ser determinadas, utilizando a diferença de temperatura entre as interfaces superior e inferior e as propriedades do filme de poliéster.

O fluxo de transferência de calor por condução pode ser determinada pela lei de *Fourier*, sendo que para sistemas em regime permanente é descrita pela Equação 5 (WELTY et al., 2007; INCROPERA; DEWITT, 1992).

$$q_{\text{cond}} = -k \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

onde, q_{cond} representa o fluxo de calor condutivo (W m⁻²) – que consiste na taxa de transferência de calor por unidade de área perpendicular à

direção da transferência, k é a condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) – constante de proporcionalidade característica do material, $dT \cdot dx^{-1}$ é a variação de temperatura ao longo da direção considerada (K m^{-1}).

O fluxo de calor por convecção pode ser calculado pela lei de Newton do resfriamento indicada pela Equação 6, sendo a taxa proporcional à diferença de temperatura entre a superfície do material e o ar da vizinhança (INCROPERA e DEWITT, 1992; KEEY, 1975; WELTY et al, 2007).

$$q_{\text{conv}} = h (T_s - T_{\text{viz}}) \quad (6)$$

onde q_{conv} representa o fluxo de calor convectivo (W m^{-2}), h é o coeficiente de transferência convectiva de calor ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) – constante de proporcionalidade que depende da geometria da superfície, da natureza do escoamento do fluido, e de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido – e T_s e T_{viz} são as temperaturas (K) da superfície e da vizinhança, respectivamente.

O fluxo térmico de radiação é calculado pela lei de Stefan-Boltzmann, indicada pela Equação 7.

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma_{\text{BOL}} (T_s^4 - T_{\text{viz}}^4) \quad (7)$$

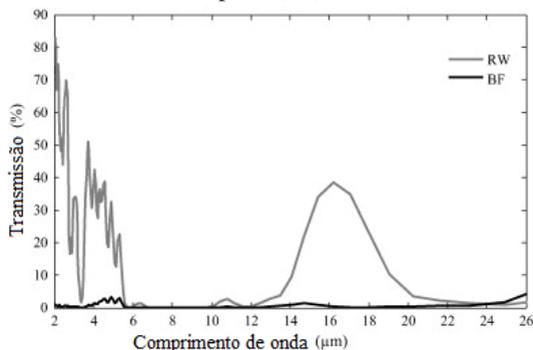
onde ε é a emissividade, σ_{BOL} é a constante de *Stefan-Boltzmann* ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) e T_s e T_{viz} são as temperaturas (K) da superfície e da vizinhança, respectivamente.

O RW apresenta como característica a secagem de produtos por meio dos três mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação), uma vez que o filme de poliéster é semitransparente à radiação infravermelha. Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015); Ortiz-Jerez e Ochoa-Martínez (2015) e Ortiz-Jerez et al. (2015) quantificaram a influência de cada mecanismo na secagem de polpa de manga e de fatias de abóbora, respectivamente, e identificaram a baixa contribuição da radiação para a secagem dos produtos.

Com o objetivo de verificar o percentual da energia proveniente da radiação que atinge a polpa de manga, Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) avaliaram os espectros de emissão da fonte de aquecimento, de transmissão do meio de propagação (*Mylar*) e de absorção do produto. Para isso, os dados de transmissividade do *Mylar* (RW) e o *Mylar* recoberto com tinta preta (BF) foram

determinados e apresentaram o comportamento representado na Figura 5.

Figura 5. Transmissividades do *Mylar* utilizado no *Refractance Window* (RW) e no filme *Mylar* recoberto com tinta preta (BF).

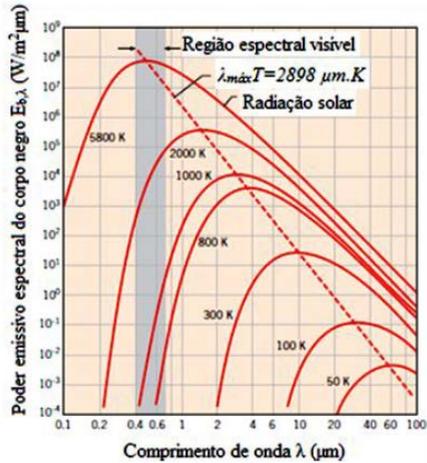


Fonte: Adaptado de ZOTARELLI; CARCIOFI; LAURINDO (2015).

De acordo com a Figura 5 o *Mylar* apresenta picos de transmissividade à radiação infravermelha incidente, principalmente, entre os comprimentos de onda de 2-6 μm e 14-19 μm ; enquanto que a tinta que recobriu o filme de poliéster bloqueou quase totalmente a radiação infravermelha proveniente da água aquecida nos comprimentos de onda avaliados (ZOTARELLI, CARCIOFI, LAURINDO, 2015).

Como a emissividade da água é de 0,96 pode ser realizada uma aproximação com o comportamento de corpo negro ($\epsilon = 1$). A partir disso, segundo a lei de deslocamento de Wien e como pode ser observado na Figura 6, o corpo negro apresenta o máximo de emissão a 100 °C ($10^2 \text{ W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$) no comprimento de onda de 9,72 μm ; enquanto que entre os comprimentos de onda de 4-40 μm , a emissão corresponde a mais do que 10 % da emissão máxima. Nessa faixa de comprimento de onda, nota-se pela Figura 5 que os picos de transmissividade do *Mylar* são em torno de 40 % (ZOTARELLI; CARCIOFI; LAURINDO, 2015).

Figura 6. Poder emissivo espectral do corpo negro.



Fonte: Adaptado de INCROPERA, 1992.

Como a polpa apresenta elevada umidade assumiu-se que a absorção de radiação pelo produto é similar a da água pura e, conseqüentemente, apresenta a maior absorção da radiação infravermelha nos comprimentos de onda de 3,0; 4,7; 6,0 e 12 μm . Dessa forma, verifica-se que o *Mylar* apresenta picos de transmissividade nesses comprimentos pela Figura 5 e, assim, mostrou-se que existe a transferência de calor por radiação no processo de RW (ZOTARELLI; CARCIOFI, LAURINDO, 2015).

A partir dessa constatação, calculou-se o fluxo de calor líquido máximo oriundo da água aquecida que atinge a polpa por radiação considerando a emissão igual ao do corpo negro ($\epsilon = 1$) pela Equação 7; e com os dados experimentais reportados por Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) o fluxo de evaporação foi estimado ($6,7 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$). A comparação entre o fluxo de transferência de calor por radiação da água ($208 \text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$) e o de evaporação da polpa comprovou que apenas 3 % do calor fornecido para a polpa durante o período de taxa constante da secagem é proveniente da radiação infravermelha emitida pela água aquecida. Como nos cálculos houve a consideração de que toda a radiação emitida pela fonte de aquecimento atravessou o *Mylar* e atingiu a polpa, pode-se afirmar que apenas parte dessa energia realmente atinge o produto – valor não superior a 50 % (ZOTARELLI; CARCIOFI; LAURINDO, 2015).

Os valores reportados por Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) estão de acordo com o quantificado por Ortiz-Jerez e Ochoa-Martínez (2015) e por Ortiz-Jerez et al. (2015) para pedaços de abóbora, que apresentaram valores em torno de 1 % como contribuição da radiação para a secagem em RW, o que o torna um método de secagem condutiva.

Sendo assim, conclui-se que a secagem por *Refractance Window* consiste em um processo de *tape-casting* que utiliza água como fonte de aquecimento para a secagem de um produto espalhado sobre uma superfície; de forma a optar-se pela denominação de *Cast-Tape Drying* (CTD).

2.2.1.2.2 Aplicações do RW

O uso desse processo de secagem é particularmente eficiente para desidratação de frutas e vegetais com ênfase na retenção dos componentes naturais e aspectos de qualidade como cor, vitaminas e retenção da atividade antioxidante (CLARKE, 2004). Esse fato é justificado pelas temperaturas amenas utilizadas e o curto tempo de secagem (NINDO et al., 2003) em relação a processos como a liofilização, onde segundo Nindo, Powers e Tang (2007) a temperatura do produto raramente ultrapassa os 70 °C ao se utilizar água a 95-98 °C, devido ao resfriamento evaporativo.

Pavan, Schimidt e Feng (2012) reportaram valores de temperatura para a polpa de açaí entre 62 e 71 °C, ao utilizar água aquecida a 94 °C em RW, com tempo de secagem inferior a 1 min e 30 s. Abonyi et al. (2002) descreve que a superfície do equipamento atinge valores entre 70 e 85 °C ao se utilizar a água de circulação entre 95 e 97 °C, relatando para a secagem de purê de cenoura um tempo de secagem de 3,75 min, com temperatura da polpa inferior a 72 °C e temperatura da água de aquecimento a 95 °C. Castoldi et al. (2014) determinou um tempo de secagem de 17 min para polpa de tomate em RW utilizando a temperatura de aquecimento de 95 °C e espessura de espalhamento de 2 mm, sendo que a polpa atingiu 70 °C.

2.3 ALIMENTOS EM PÓ

Os alimentos em pó são normalmente obtidos a partir de matérias-primas agrícolas submetidos a diferentes processos como *spray-drying*, fragmentação, liofilização, secagem em tambor, entre

outros. Apresentam como vantagem a maior facilidade de preservação, transporte e armazenamento, pela redução do teor de água. Além disso, possuem funcionalidades específicas como a estabilidade físico-química e microbiológica, qualidades organolépticas e composição nutricional (CUQ; RONDET; ABECASSIS, 2011; FITZPATRICK; AHRNÉ, 2005).

As indústrias alimentícias podem utilizar os pós como intermediários para elaboração de outros produtos - como ovos em pó, leite em pó, temperos, corantes – ou para venda direta ao consumidor (CUQ; RONDET; ABECASSIS, 2011).

Os alimentos em pó são sistemas complexos que apresentam variação em suas propriedades devido à complexidade, heterogeneidade e variabilidade das matérias-primas agrícolas, além da reatividade quando submetidos a altas temperaturas ou adição de água (CUQ; RONDET; ABECASSIS, 2011).

A maior parte dos alimentos em pó é consumida após uma etapa preliminar de elaboração com adição de água ou outros ingredientes, sendo então necessário o estudo da reidratação desse tipo de produto (CUQ; RONDET; ABECASSIS, 2011; FITZPATRICK; AHRNÉ, 2005).

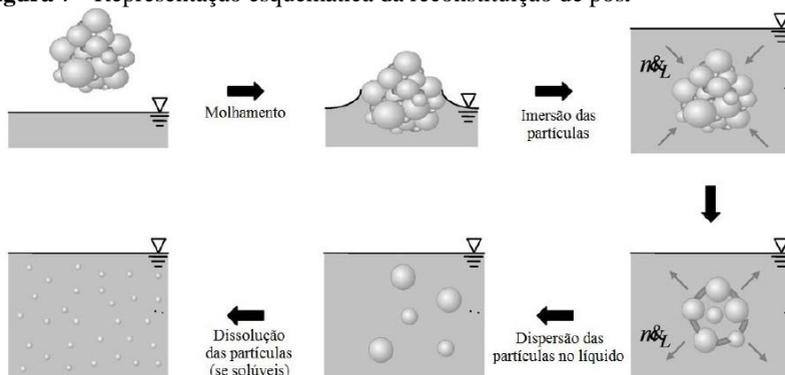
2.3.1 Reidratação de pós

A reconstituição de produtos em pó é um dos principais indicadores de qualidade, devendo ser rápida (poucos segundos) e completa. Esse comportamento ideal de reconstituição é influenciado pelos processos a que o produto foi submetido, quantidade de partículas pequenas e a presença de gordura ou óleo (HOGEKAMP; SCHUBERT, 2003). No entanto, pode-se reduzir o tempo de reconstituição - que consiste no tempo necessário para solubilizar o pó na solução ao otimizar a microestrutura, a estrutura supramolecular ou a composição (FORNY; MARABI; PALZER, 2011).

Ao espalhar um pó na superfície de um líquido, ocorrem as seguintes etapas: i) dispersão do aglomerado com penetração do líquido dentro do sistema poroso devido às forças de capilaridade; ii) imersão das partículas dentro do líquido; iii) dissolução das ligações entre as partículas primárias seguida pela dispersão do pó com um pouco de agitação; e iv) solubilização das partículas no líquido. Essas etapas representadas na Figura 7 ocorrem simultaneamente, sendo afetadas

umas pelas outras (FORNY; MARABI; PALZER, 2011; SCHUBERT, 1987).

Figura 7 - Representação esquemática da reconstituição de pós.



Fonte: Adaptado de FORNY; MARABI; PALZER, 2011.

Normalmente, pós com partículas inferiores a 100 μm tendem a formar aglomerados quando misturados com água, sendo necessária agitação mecânica para dispersá-lo homogeneamente ou dissolvê-lo no líquido. Nesse caso, quando a água penetra nos espaços vazios entre as partículas, em função das forças capilares, o pó começa a se dissolver e uma espessa massa (consistência de gel) que resiste a penetração da água se forma, pelo aumento da viscosidade do líquido. Sendo assim, aglomerados contendo pó seco no seu interior são formados e, caso o ar seja aprisionado nesse momento, eles irão flutuar na superfície do líquido, resistindo assim à dispersão. Os aglomerados de pós que possuem uma estrutura aberta permitem uma rápida dispersão do ar, devido às largas passagens entre as partículas individuais do pó, de forma a permitir a penetração do líquido antes da formação dessa camada (APV, 2015; HOGEKAMP; SCHUBERT, 2003).

A molhabilidade do pó está associada à afinidade dos compostos presentes com a água, sendo influenciada pela quantidade de substâncias hidrofílicas e hidrofóbicas. Essa propriedade pode ser relacionada com a aglomeração, granulação, recobrimento, secagem, dissolução e dispersão; e é determinada pela medida do ângulo de contato. Caso a superfície do pó seja recoberta com componentes hidrofóbicos – como lipídeos – o ângulo de contato com a água será grande, enquanto que superfícies recobertas com substâncias hidrofílicas – como carboidratos

- o ângulo de contato com a água será menor (FORNY; MARABI; PALZER, 2011; LAZGHAB et al., 2005).

O ângulo de contato de superfícies sólidas é influenciado pelas propriedades físico-químicas do líquido, rugosidade da superfície, heterogeneidade química, isothermas de sorção, orientação molecular, intumescimento e dissolução do sólido no líquido. Caso as forças de adesão entre o sólido e o líquido sejam mais fortes que a coesão do líquido e as forças de adesão sólido-gás, o molhamento ocorre espontaneamente – sem a necessidade de agitação, por exemplo - (CUQ; RONDET; ABECASSIS, 2011; LAZGHAB et al., 2005).

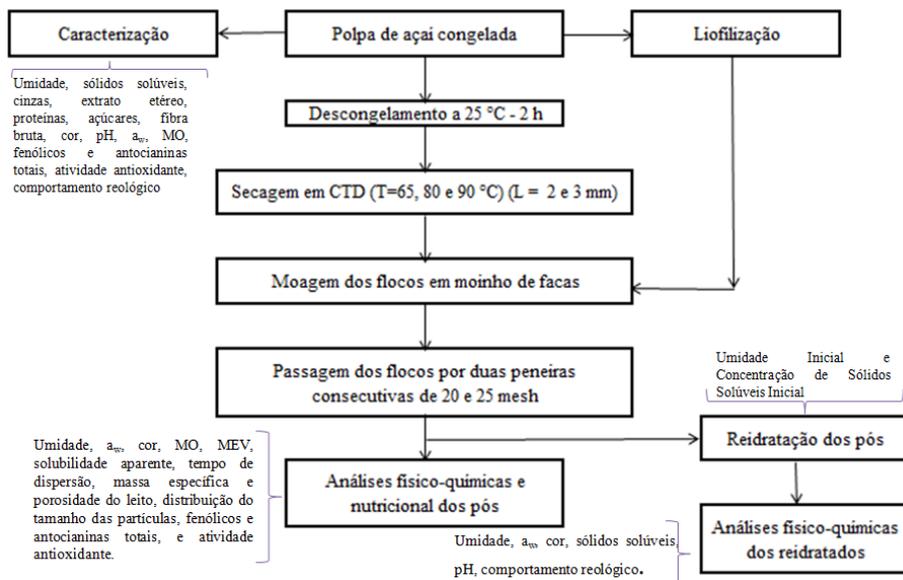
A imersão das partículas está associada com o tamanho e a massa específica do pó, sendo prejudicada pela presença de partículas finas ou ocas e pelo intumescimento das mesmas (HOGEKAMP; SCHUBERT, 2003).

Para a dispersão de um pó é necessário que as partículas se acomodem lentamente ou permaneçam suspensas para não formar sedimentos após um certo período de tempo, sendo que para evitar a formação desses sedimentos podem-se utilizar partículas pequenas ou aumentar a viscosidade do líquido (HOGEKAMP; SCHUBERT, 2003).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O processamento e a caracterização físico-química da matéria-prima (polpa de açaí congelada), dos pós obtidos pelas diferentes condições em *Cast-Tape Drying* e liofilizado; e das polpas reconstituídas ocorreram segundo o diagrama esquemático representado na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma representativo das etapas e análises realizadas no presente estudo.



3.1 AMOSTRAS

A polpa de açaí (*Euterpe oleracea*) congelada foi adquirida no comércio local de Belém-PA e estocada em *freezer* à -18 °C . Para serem utilizadas nos experimentos, as amostras, cerca de 160 g cada, foram descongeladas por 2 h em temperatura de $22,9 \pm 0,8\text{ °C}$ com umidade relativa de $65,4 \pm 5,6\%$.

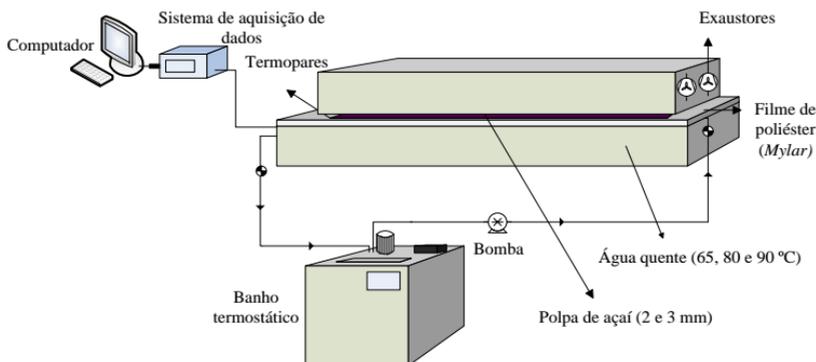
3.2 CARACTERIZAÇÃO CENTESIMAL DO AÇAÍ

As análises de umidade (012/IV), cinzas (018/IV), extrato etéreo (032/IV), proteínas (036/IV), açúcares (038/IV) e fibra bruta (044/IV) seguiram as metodologias do Instituto Adolfo Lutz (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008).

3.3 APARATO EXPERIMENTAL

Para a realização da secagem da polpa de açaí foi utilizado o aparato experimental representado pela Figura 9, construído no Laboratório de Propriedades Físicas dos Alimentos na Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Figura 9- Representação esquemática do secador utilizado para o desenvolvimento do estudo.



O sistema consiste em um recipiente metálico retangular (0,8 m x 0,4 m x 0,05 m), aonde circula água aquecida proveniente de um banho termostático. No interior desse recipiente existem chicanas para a homogeneização do escoamento sobre o filme de poliéster (*Mylar*) de 0,25 mm de espessura que se encontra parafusado sobre a sua superfície, de forma a permanecer totalmente esticado, permitindo um espalhamento uniforme. Termopares do tipo T estão alocados ao longo do reservatório e são ligados a um sistema *online* (Agilent Technologies, Modelo 34970A, Suíça) para a aquisição de dados de forma a garantir um acompanhamento da temperatura da água de aquecimento. O equipamento possui um exaustor móvel, utilizado para a retirada de vapores de água oriundos da secagem do produto do sistema.

3.4 SECAGEM DA POLPA DE AÇAÍ EM CTD

A secagem da polpa de açaí foi realizada em ambiente com umidade relativa do ar entre 61 % e 72 % e temperatura de $24,6 \pm 0,8$ °C. A polpa foi espalhada sobre o Mylar com o auxílio do *doctor blade*, que permitiu o ajuste da espessura de 2 e 3 mm e foram utilizadas as temperaturas da água de 65, 80 e 90 °C. Os experimentos foram realizados em triplicata (em dias distintos), sendo as amostras retiradas da região central da polpa em três pontos diferentes – como representado pelas regiões 1, 2 e 3 na Figura 10 - em intervalos de tempo pré-determinados de acordo com o indicado na Tabela 1 para cada condição de secagem em CTD.

Figura 10 - Divisão do espalhamento em três regiões distintas como indicado pelos números 1, 2 e 3 para a retirada das amostras nos tempos de secagem pré-determinados.

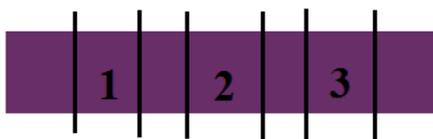


Tabela 1 - Intervalos de tempo para a retirada dos pontos na secagem de polpa de açaí em CTD.

Temperatura de aquecimento (°C)	Espessura do filme (mm)	Intervalos de tempo para a retirada das amostras (min)
65	2	4
	3	8
80	2	4
	3	8
90	2	2
	3	2

A variação temporal da umidade da polpa foi determinada pelo método gravimétrico em estufa a vácuo (TECNAL, modelo TE-395, Brasil) a 70 °C (A.O.A.C., 2005). Duas funções foram ajustadas aos dados experimentais - modelo exponencial e modelo de duas fases - do decaimento da umidade em base seca, adimensionalizada em relação à amostra *in natura*, com o tempo de secagem.

A função exponencial – representada pela Equação 8 - foi ajustada aos dados de umidade livre em base seca (g g^{-1}) vs tempo de secagem (min), considerando que o perfil linear inicial pode ser desprezado em função de apresentar um curto intervalo de tempo se comparado com o tempo total de secagem.

$$X = a \exp(bt) \quad (8)$$

onde X é a umidade livre em base seca (g g^{-1}); a e b são parâmetros do modelo e t é o tempo em minutos.

O modelo de duas fases – representado pela Equação 9 – foi ajustado aos dados de umidade livre em base seca (g g^{-1}) vs tempo de secagem (min) considerando os períodos de taxa constante e decrescente.

$$\frac{X}{X_0} = f \cdot \exp(-b \cdot t) + (1 - f) \exp(-ct) \quad (9)$$

onde X e X_0 são as umidades livres em base seca (g g^{-1}) no tempo considerado e inicial, respectivamente; f, b e c são os parâmetros do modelo e t é o tempo de secagem em minutos.

O ar de secagem dentro da câmara de exaustão - determinado com o auxílio de um anemômetro - apresentou temperatura de $42,6 \pm 2,9$ °C e velocidade média de $0,48 \pm 0,04$ m.s^{-1} .

Determinação das taxas de secagem

As taxas de secagem foram obtidas a partir da derivada da curva suavizada da evolução temporal da umidade.

Cálculo da capacidade evaporativa (CE)

A capacidade evaporativa de cada processo de secagem foi calculada de acordo com a Equação 10.

$$CE = \left[\left(\frac{dX}{dt} \right) (1 - X_{B.U.}) \rho L \right] \quad (10)$$

onde CE é a capacidade evaporativa ($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$); dX é a variação da umidade do produto em base seca (kg kg^{-1}), respectivamente; dt é a variação do tempo de secagem (h); $X_{B.U.}$ é a umidade inicial da polpa de

açai em base úmida (0,81); ρ é a massa específica da polpa de açai ($990,1 \text{ kg m}^{-3}$) e L é o *gap* utilizado no *doctor blade* (m). A massa específica foi determinada em picnômetro.

A função linear foi ajustada aos dados de capacidade evaporativa vs umidade e é representada pela Equação 11.

$$CE = aX + b \quad (11)$$

onde a e b são os parâmetros do modelo.

Evolução temporal da temperatura

A evolução temporal da temperatura da polpa de açai durante o processo de secagem foi realizada utilizando-se termopares e uma câmera termográfica. Nas duas técnicas, a amostra foi espalhada com o *doctor blade* (espalhador manual) e delimitou-se a área de aquisição de dados por meio de uma moldura retangular de poliestireno de 11 cm x 16 cm.

Na determinação do perfil de temperatura foram utilizados três termopares do tipo T (IOPE, modelo A-TX-TF-R-30A WG, Brasil) alocados em diferentes regiões da polpa como representado na Figura 11, enquanto que oito termopares dispostos em distintos pontos do reservatório do CTD registraram a temperatura da água no equipamento. A aquisição de dados ocorreu por meio do programa Agilent (modelo 34970A, Malásia), registrados *online* em computador.

O registro das imagens termográficas foi realizado por uma câmera termográfica (Flir, modelo T360, Suécia) posicionada a 60 cm da superfície da polpa espalhada, sendo as imagens analisadas posteriormente pelo *software* FLIR QuickReport 1.2 SP2, utilizando-se pontos em posições similares às leituras dos termopares (Figura 11) para determinação das temperaturas.

A emissividade do açai foi determinada pelo método proposto por Albatici et al. (2013) com auxílio de um termômetro de infravermelho (FLUKE®, modelo 62 MAX+, China), onde uma fita isolante de emissividade conhecida ($\varepsilon=0,95$) é colada sobre a superfície do equipamento e a emissividade da amostra é ajustada conforme a temperatura da fita isolante registrada. O valor definido para a emissividade da amostra foi de 0,96.

Figura 11- Representação dos pontos (✦) da polpa onde os termopares foram posicionados para a realização do perfil de temperatura e analisados no software FLIR QuickReport 1.2 SP2 para determinação da temperatura nas termografias.



Fluxo de calor através do Mylar

Foi estimado o fluxo de calor médio condutivo e de radiação no filme de poliéster (*Mylar*) utilizado no CTD pelas lei de *Fourier* para sistemas com transferência de calor unidimensional e a lei de *Stefan-Boltzman*, como indicados nas Equações 12 e 13, respectivamente.

$$q_{\text{cond}} = \frac{k(T_{\text{água}} - T_{\text{polpa}})}{L} \quad (12)$$

onde q_{cond} é o fluxo de calor condutivo (W m^{-2}), k e L são a condutividade térmica ($0,15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e a espessura do *Mylar* ($2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$), respectivamente; $T_{\text{água}}$ é a temperatura da água que circula no CTD (K) e T_{polpa} é a temperatura média da polpa obtida com o auxílio das termografias para cada condição estudada (K).

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma_{\text{BOL}} (T_{\text{água}}^4 - T_{\text{polpa}}^4) \quad (13)$$

onde q_{rad} é o fluxo de calor de radiação (W m^{-2}), ε é a emissividade do corpo negro ($\varepsilon = 1$), σ_{BOL} é a constante de *Stefan-Boltzman* ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

Para a estimativa do fluxo de radiação no *Mylar*, foi considerado que o filme de poliéster apresenta uma emissividade igual do corpo negro ($\varepsilon = 1$) com o objetivo de verificar qual seria a contribuição máxima da radiação na secagem da polpa.

As resistências condutiva e de radiação à transferência de calor através do *Mylar* foram estimadas pelas Equações 14 e 15, respectivamente, a fim de verificar a ordem de grandeza entre as duas.

$$R_{m,k} = \frac{L_m}{k_m} \quad (14)$$

onde $R_{m,k}$ é a resistência condutiva ($m^2 K W^{-1}$), L_m é a espessura ($2,5 \cdot 10^{-4} m$) e k_m é a condutividade térmica ($0,15 W m^{-1} K^{-1}$) do filme de poliéster, respectivamente, utilizado no aparato experimental.

$$R_{m,r} = \frac{1}{h_r} = \frac{1}{\varepsilon \sigma_{BOL} (T_b + T_i)(T_b^2 + T_i^2)} \quad (15)$$

em que $R_{m,r}$ é a resistência à radiação ($m^2 K W^{-1}$), h_r é o coeficiente de transferência de calor por radiação ($W m^{-2} K^{-1}$), ε é a emissividade do *Mylar*, σ_{BOL} é a constante de *Stefan-Boltzman* ($5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$), T_b é a temperatura da interface água-*Mylar* (K) e T_i é a temperatura da interface *Mylar*-polpa (K).

Na estimativa da resistência à radiação foi considerada que a temperatura da interface água – *Mylar* era igual à temperatura da água aquecida e que a temperatura da interface *Mylar* – polpa era igual à temperatura da polpa (determinada utilizando as imagens termográficas). Além disso, foi considerada a emissividade do *Mylar* igual à do corpo negro ($\varepsilon=1$) para estimar a menor resistência à transferência de calor pelo mecanismo de radiação.

3.5 LIOFILIZAÇÃO

A polpa de açaí foi liofilizado em liofilizador de bancada (LIOTOP, Modelo L101, Brasil).

3.6 MOAGEM E CLASSIFICAÇÃO DO PÓ

Ao final do processo de secagem, definido quando a polpa atingisse 3 % de umidade em base úmida, o pó resultante, assim como o pó obtido pela liofilização, foi submetido à moagem em moinho de facas (TECNAL, Modelo TE 631/2, Brasil) e classificado em duas peneiras consecutivas de 20 e 25 mesh.

3.7 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS

As análises físico-químicas realizadas para a polpa, os pós e as polpas reconstituídas de açai estão indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Análises realizadas com a polpa, o pó e a polpa reconstituída.

Análise	Polpa de açai	Pó	Polpa reconstituída
Umidade (A.O.A.C., 2005)	X	X	X
Atividade de água (Higrômetro digital)	X	X	X
COR (Colorímetro, escala CIELAB)	X	X	X
Microscopia Óptica (Microscópio Olympus, LAMEB)	X	X	X
Solubilidade Aparente (Dacanal e Menegalli, 2009)		X	
Tempo de Dispersão (Dacanal, 2005)		X	
Massa Específica e Porosidade do Leito (Barbosa-Cánovas et al., 2005; Goula e Adamopoulos, 2008; Keng, 1970)		X	
Distribuição do Tamanho das Partículas (Difração de laser)		X	
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (LCME)		X	
Determinação dos fenólicos totais (Singleton, Orthofer e Lamuela-Raventos, 1999)	X	X	
Determinação das antocianinas totais (Giusti e Wrolstad, 2001)	X	X	
Determinação da atividade antioxidante (ABTS e DPPH)	X	X	
Sólidos Solúveis (Refratômetro de bancada)	X		X
Potencial Hidrogeniônico (pH) (pHmetro)	X		X
Comportamento reológico (Cilindros concêntricos, CERMAT)	X		X

3.7.1 Umidade

A umidade das amostras da polpa, do pó e do pó reidratado de açai foi determinada pelo método gravimétrico em estufa a vácuo a 70 °C (TECNAL, Modelo TE-395, Brasil), conforme descrito na metodologia A.O.A.C. (2005), em triplicata. O cálculo das umidades em base seca está representado pela Equação 16.

$$X = \frac{m_o - m_f}{m_f} \quad (16)$$

na qual X é a umidade em base seca (g g^{-1}), m_o e m_f são as massas (g) da amostra inicial e de sólidos secos, respectivamente.

3.7.2 Atividade de água (a_w)

A atividade de água das amostras da polpa, do pó e da polpa reconstituída foi determinada por higrômetro digital (Aqualab, Decagon Devices, USA), em triplicata.

3.7.3 Cor

A cor das amostras – polpa, pó e pó reidratado - foi determinada em colorímetro MiniScan (EZ, HunterLab, USA) em escala CIELAB, sendo expressas em termos de luminosidade L^* ($L^* = 0$: preto; $L^* = 100$: branco), a^* ($+a^*$ = vermelho; $-a^*$ = verde) e b^* ($+b^*$ = amarelo; $-b^*$ = azul). As amostras da polpa, pós e pós reidratados foram acondicionadas em placa de petri sobre uma superfície branca, onde realizou-se as análises em quintuplicata. A diferença de cor (ΔE) entre as amostras reconstituídas em relação à polpa original descongelada foi obtida pela Equação 17.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (17)$$

na qual o subscrito 0 representa o parâmetro respectivo da cor original.

Foram calculados o ângulo Hue e o parâmetro Chroma pelas Equações 18 e 19, para determinação a propriedade e a intensidade de saturação da cor apresentada, respectivamente.

$$\text{Hue} = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (18)$$

$$\text{Chroma} = (a^{*2} + b^{*2})^{0,5} \quad (19)$$

3.7.4 Microscopia Óptica

A polpa de açaí, os pós reidratados e as amostras em pó dispersas em glicerol foram observadas em microscópio óptico com aumento de 40 vezes (Microscópio Olympus, modelo Bx41) no Laboratório Multiusuário de Estudos em Biologia (LAMEB) na Universidade Federal de Santa Catarina. Os pós foram reidratados com água destilada à temperatura ambiente por 1 h na proporção de 1 g de pó para cada 5 mL de água destilada.

3.8 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO PÓ

3.8.1 Solubilidade Aparente

A solubilidade aparente (SOL) dos pós de açai foi determinada pela adição de 1 g de pó em 100 mL de água destilada a 25 °C de acordo com a metodologia proposta por Dacanal e Menegalli (2009) com algumas modificações. A análise resulta na determinação da percentagem de material não solubilizado após 1 minuto de agitação e retido em filtro pelo método gravimétrico em estufa a 105 °C (TECNAL, Modelo TE-394/2, Brasil) por 24 horas. A solubilidade é calculada a partir da Equação 20.

$$\text{SOL} = 100 - \left[\frac{m_1}{m_0 (1 - U_{B.U.})} 100 \right] \quad (20)$$

em que, m_0 e m_1 são as massas inicial e da amostra remanescente no filtro (g), respectivamente; $U_{B.U.}$ é a umidade inicial do pó analisado, em base úmida. As análises foram realizadas em triplicata.

3.8.2 Tempo de Dispersão

A determinação do tempo de dispersão ocorreu no aparato experimental – apresentado na Figura 12 - desenvolvido e adaptado por Dacanal (2005), baseado no esquema apresentado por Hogekamp e Schubert (2003). O aparato consiste em um recipiente com 80 mL de água destilada, à temperatura entre 27 e 29 °C, com uma lâmina móvel, sobre a qual se coloca 1 g da amostra de pó de modo que ao deslocá-la o pó entre em contato com a água. A partir deste momento o tempo necessário para que ocorra a submersão de todas as partículas é monitorado, determinando o tempo de dispersão.

Figura 12- Aparato experimental desenvolvido e adaptado por Dacanal (2005) utilizado para determinar o tempo de dispersão dos pós de açai.



Fonte: Dacanal, 2005.

3.8.3 Massa Específica e Porosidade do Leito de Partículas.

A massa específica aparente do leito de partículas foi medida vertendo-se aproximadamente 5 g do pó de açai em uma proveta graduada de 25 mL, e realizando batidas repetidamente sobre uma superfície reta e com uma distância de aproximadamente 2 cm entre a superfície e a proveta, até que a altura do leito de partículas manteve-se constante entre as batidas sucessivas, fato que foi garantido após 100 batidas. Em seguida, sabendo a massa de pó adicionada à proveta, calculou-se a massa específica aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

A massa específica absoluta foi determinada em picnômetro de gás hélio (AccuPyc II 1340, Micromeritics, E.U.A.). As amostras dos pós de açai foram acondicionadas em cápsulas de alumínio com volume de 10 cm^3 e inseridas no equipamento. Quando a pressão do gás hélio dentro da câmara do picnômetro é reduzida de uma pressão inicial (P_1) até a pressão final (P_2), após a inserção da cápsula contendo a amostra, o gás dentro do sistema passa por uma expansão volumétrica (KENG, 1970), calculando o volume real a partir da Equação 21.

$$V_{\text{am}} = V_{\text{cap}} - \frac{V_{\text{exp}}}{P_1/P_2 - 1} \quad (21)$$

onde V_{am} , V_{cap} e V_{exp} são os volumes da amostra, da cápsula e da expansão, respectivamente, expressos em cm^3 .

Como a massa da amostra (m_{am}) contida na cápsula é fornecida ao equipamento, a massa específica real (ρ_{real}) foi calculada a partir da divisão da massa pelo volume da amostra, expressa em $g.cm^{-3}$, como representado pela Equação 22.

$$\rho_{real} = \frac{m_{am}}{V_{am}} \quad (22)$$

A porosidade do leito pode ser calculada segundo a Equação 23.

$$\theta = \frac{\rho_{real} - \rho_{ap}}{\rho_{real}} \quad (23)$$

onde ρ_{real} e ρ_{ap} são as massas específicas real e aparente das partículas, respectivamente; e θ é a porosidade do leito.

3.8.4 Distribuição do Tamanho das Partículas

A distribuição do tamanho de partículas foi determinada por difração a laser (Mastersizer, Mastersizer 2000, Malvern Instruments, Reino Unido). As amostras de pó foram dispersas em etanol 99,5 %, utilizando-se agitação magnética.

O diâmetro médio das partículas foi expresso pelo diâmetro de Brouckere ($D[4,3]$), que indica o tamanho das partículas que constituem a maior parte do volume da amostra, de forma a permitir identificar o tamanho de partículas grosseiras.

3.8.5 Morfologia do Pó

A morfologia dos pós de açaí foi realizada utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura convencional (MEV) com filamento de tungstênio (JEOL, Modelo JSM-6390LV, E.U.A.), sendo as amostras recobertas com ouro em metalizador (LEICA, Modelo SCD 500, Alemanha) anteriormente a análise. A voltagem de aceleração utilizada foi de 10 kV.

3.9 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO PÓ

A caracterização química foi realizada com o intuito de verificar quais seriam as perdas resultantes do processamento da polpa de açaí em termos de compostos fenólicos e antocianinas totais e atividade

antioxidante. Para a realização dessas análises foi necessário preparar um extrato a partir da polpa descongelada e do pó.

3.9.1 Preparação dos Extratos

Os extratos foram preparados utilizando-se como solução extratora metanol/água/ácido fórmico (50:48,5:1,5). O procedimento consistiu em adicionar 0,5 g de amostra em 25 mL da solução extratora. Em seguida, o material foi mantido em ultrassom (UltraSonic Clean, Maxi Clean, Modelo 1400A, Unique, Brasil) por 2 min e centrifugado (SIGMA, Modelo 4K15, Alemanha) por 5 min a 6000 rpm. Após esse processo, o sobrenadante foi filtrado e repetiu-se o procedimento, a partir da adição da solução extratora, por mais duas vezes. A solução obtida foi completada em balão volumétrico de 100 mL com água destilada. Para a polpa de açaí realizou-se o cálculo da massa equivalente a 0,5 g de pó, a partir do balanço de massa, considerando a umidade do produto de 3 % em base úmida; sendo o extrato preparado conforme descrito anteriormente.

3.9.2 Determinação dos compostos fenólicos totais

A concentração de compostos fenólicos foi determinada pelo método de Singleton, Orthofer e Lamuela-Raventos (1999), onde foram adicionados 2,5 mL de solução de reagente Folin-Ciocalteu (diluído 1:10 em água destilada) em 0,5 mL de solução extrato. Depois de 5 min, 2 mL de solução de carbonato de sódio 7,5 % foram adicionados, sendo as absorbâncias lidas no comprimento de onda de 760 nm após 2 h em espectrofotômetro (FEMTO, Modelo 800XI, Brasil). A reação ocorreu em vidro âmbar para reduzir o contato com a luz ambiente. Os resultados foram expressos em mg de ácido gálico equivalentes por 100 g de extrato seco obtidos a partir da comparação com a curva padrão de ácido gálico.

3.9.3 Determinação das antocianinas totais

As antocianinas totais foram quantificadas utilizando-se o protocolo de espectrofotometria de pH diferencial (GIUSTI; WROLSTAD, 2001), pelas medidas das absorbâncias à 520 e 700 nm em espectrofotômetro (FEMTO, Modelo 800XI, Brasil) com soluções tampão de pH 1,0 e pH 4,5. O conteúdo de antocianinas foi calculado a

partir da Equação 24, sendo expresso em mg de cianidina-3-glicosídica equivalentes por litro.

$$C = \frac{A \times M \times Fd \times 10^3}{\epsilon \times l} \quad (24)$$

onde C é o conteúdo de antocianinas (mg.L^{-1}); A é a diferença de absorbâncias nos comprimentos de onda de 520 e 700 nm nos dois pHs analisados [$A = (A_{520} - A_{700})_{\text{pH}1,0} - (A_{520} - A_{700})_{\text{pH}4,5}$]; M é a massa molar da cianidina-3-glicosídica ($449,2 \text{ g.mol}^{-1}$); Fd é o fator de diluição; 10^3 é a conversão da massa para mg; ϵ é a absorvidade molar da cianidina-3-glicosídica ($26900 \text{ L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$); l é a espessura da cubeta (cm).

Para fins de comparação com outros trabalhos, a concentração de antocianinas foi transformada para mg de cianidina-3-glicosídica equivalentes por 100 g de extrato seco.

3.9.4 Determinação da atividade antioxidante

Captura do radical livre ABTS

Preparou-se uma solução estoque de ABTS 7 mM em persulfato de potássio 2,45 mM, que foi armazenada em local escuro e à temperatura ambiente por 12 – 16 horas, segundo descrito por Re et al. (1999). Anteriormente as análises, essa solução foi diluída em etanol a fim de atingir a absorbância de $0,70 \pm 0,02$ no comprimento de onda de 734 nm. Em seguida, adicionaram-se 3 mL da solução diluída de ABTS em 30 μL de extrato, incubando-os a 30 °C por 25 min ao abrigo da luz. O espectrofotômetro (HACH, Modelo DR 5000, Alemanha) foi calibrado com a solução de etanol. O cálculo da atividade antioxidante, expresso em percentagem de inibição, foi realizado a partir da Equação 25.

$$\text{Inibição (\%)} = \left(\frac{A_{\text{controle}} - A_{\text{amostra}}}{A_{\text{controle}}} \right) \times 100 \quad (25)$$

onde, A_{controle} e A_{amostra} são as absorbâncias do controle (sem extrato) e das amostras com extrato, respectivamente.

A partir dos valores calculados, utilizou-se a curva padrão Trolox para comparação, de forma a expressar a atividade antioxidante em μM de Trolox equivalentes por grama de amostra seca.

Captura do radical livre DPPH

A atividade antioxidante foi determinada pela captura do radical livre DPPH, segundo a metodologia descrita por Brand-Williams, Cuvelier e Berset (1995). Inicialmente, dilui-se 10 mg de amostra em 20 mL de água destilada conforme descrito por Tonon, Brabet e Hubinger (2010). Em seguida, alíquotas de 100 µL do reconstituído foram adicionadas a 3,9 mL de solução metanólica de DPPH 6×10^{-5} M, seguidas por agitação em vórtex. A reação ocorreu por 60 min, ao abrigo da luz em temperatura ambiente. Após esse período, a absorbância das amostras foi lida em espectrofotômetro (HACH, Modelo DR 5000, Alemanha) no comprimento de onda de 515 nm, sendo o equipamento calibrado com metanol. A atividade antioxidante foi calculada a partir da Equação 25. Os resultados foram expressos em µM de Trolox equivalentes por grama de amostra seca, determinados a partir da comparação com a curva padrão de Trolox.

3.10 CARACTERIZAÇÃO DAS POLPAS RECONSTITUÍDAS

Foi realizado um estudo da reidratação dos pós de açaí em relação à umidade e à concentração de sólidos solúveis (°Brix) iniciais da polpa, adicionando-se água destilada aos pós à temperatura ambiente. As análises englobaram a umidade, atividade de água, cor e microscopia óptica, segundo metodologias descritas no tópico 3.7.

3.10.1 Sólidos Solúveis

O teor de sólidos solúveis foi determinado em refratômetro de bancada (Zeiss, Jena, Alemanha), expresso em °Brix e em triplicata.

3.10.2 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH foi medido utilizando um pHmetro (Quimis, Modelo Q400A, Brasil), em duplicata de análise.

3.10.3 Comportamento Reológico

Para a realização da reologia, adicionou-se água destilada nas amostras de pó até atingir a concentração de sólidos solúveis (°Brix) da polpa de açaí (matéria-prima). A determinação da curva característica das suspensões ocorreu em viscosímetro de cilindros concêntricos

(ThermoHaake, Modelo Viscotester 550, Alemanha), sendo utilizado o sensor SV 2P para soluções altamente viscosas e com *gap* de 1,45 mm.

Com o objetivo de avaliar e eliminar a tixotropia, as amostras foram submetidas a três rampas de tensão de cisalhamento, sendo a primeira e a terceira uma crescente de tensão e a segunda uma decrescente de tensão. A taxa de deformação utilizada foi de 0 a 300 s⁻¹.

O modelo utilizado para ajustar os dados experimentais das curvas de escoamento foi o de Herschel-Bulkley, representado pela Equação 26.

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (26)$$

onde σ é a tensão de cisalhamento (Pa) – índice zero representa a tensão crítica - , K é o índice de consistência (Pa.sⁿ), n (adimensional) é o índice de comportamento do fluido e $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação (s⁻¹).

3.11 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística dos resultados foi realizada pelo *software* STATISTICA® 8.0, utilizando a análise de variância simples (ANOVA). O teste de Tukey foi empregado para comparar se as médias apresentaram diferença significativa a um nível de 10 % ($p < 0,10$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO AÇAÍ

A composição centesimal da polpa de açaí (*Euterpe oleracea*) utilizada no presente trabalho encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição centesimal da polpa de açaí (*Euterpe oleracea*).

Componente analisado	Valor médio (% b.s.)	Valor médio (% b.u)
Umidade	-	80,97 ± 0,11
Proteínas	9,58 ± 0,07	1,82 ± 0,07
Lipídeos	46,79 ± 0,08	8,89 ± 0,08
Açúcares totais	3,47 ± 0,06	0,66 ± 0,06
Fibras	36,84 ± 0,19	7,00 ± 0,19
Cinzas	3,53 ± 0,04	0,67 ± 0,04

* “b.s.” base seca e “b.u.” base úmida.

Segundo a classificação do padrão de identidade e de qualidade para a polpa de açaí definido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2000), a matéria-prima utilizada encontra-se na denominação de açaí especial por apresentar um teor de sólidos superior a 14 %, sendo conhecida regionalmente como açaí-papa.

Os valores médios encontrados estão de acordo com os determinados pelo MAPA, sendo similares aos obtidos por Tonon et al. (2009) e superiores aos apresentados por Tonon, Brabet e Hubinger (2010) para polpa de açaí congelada. Isso pode ser explicado pelo fato da composição do açaí variar de acordo com o período da coleta e com o grau de maturação dos frutos. Com o amadurecimento, o teor de lipídeos aumenta, enquanto as cinzas, proteínas e açúcares totais são reduzidos (GORDON et al., 2012).

A amostra analisada apresentou um pH de $5,00 \pm 0,03$ – estando de acordo com a legislação vigente que exige um pH entre 4,00 e 6,20 para esse produto (MAPA, 2000) - e inferior ao $5,2 \pm 0,1$ obtido por Tonon et al. (2009). Dessa forma, a polpa de açaí é classificada como um alimento pouco ácido ($\text{pH} \geq 4,5$), o que possibilita o desenvolvimento de formas microbianas esporulantes. A atividade de água medida foi de $0,998 \pm 0,001$, permitindo a ocorrência de processos químicos e microbianos de degradação. Por isso, torna-se necessária a

realização de tratamentos para a sua conservação. O teor de sólidos solúveis da matéria-prima foi de $10,0 \pm 1,2$ °Brix.

4.2 EVOLUÇÃO TEMPORAL DA UMIDADE, TAXAS DE SECAGEM E CAPACIDADE EVAPORATIVA

Evolução temporal da umidade

Observando as curvas de secagem apresentadas nas Figuras 13 e 14 pode-se analisar, respectivamente, a influência da temperatura da água sob o filme polimérico de *Mylar* e da espessura de espalhamento da polpa de açaí sobre a evolução temporal da umidade das amostras. Nas Figuras 13 e 14 estão apresentados apenas os resultados de uma curva de cada condição experimental a fim de facilitar a visualização dos dados. Isso pode ser feito devido à boa reprodutibilidade dos resultados, como pode ser observado no Anexo A.

Figura 13- Curva de secagem adimensionalizada da polpa de açaí espalhadas sobre o *Mylar* com *gap* nas espessuras de 2 e 3 mm em relação à umidade da polpa *in natura*. As cores azul, preta e vermelha representam as temperaturas de 65, 80 e 90 °C, respectivamente. Os modelos exponenciais ajustados aos dados experimentais – com os respectivos desvios-padrão - são representados pelas linhas contínuas nas respectivas cores.

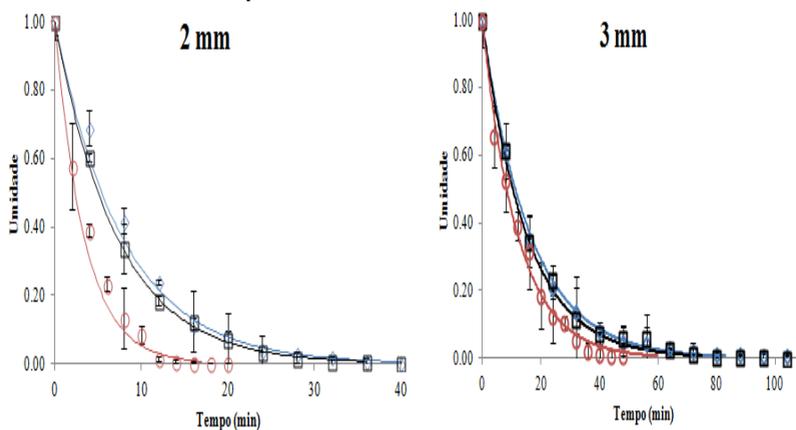
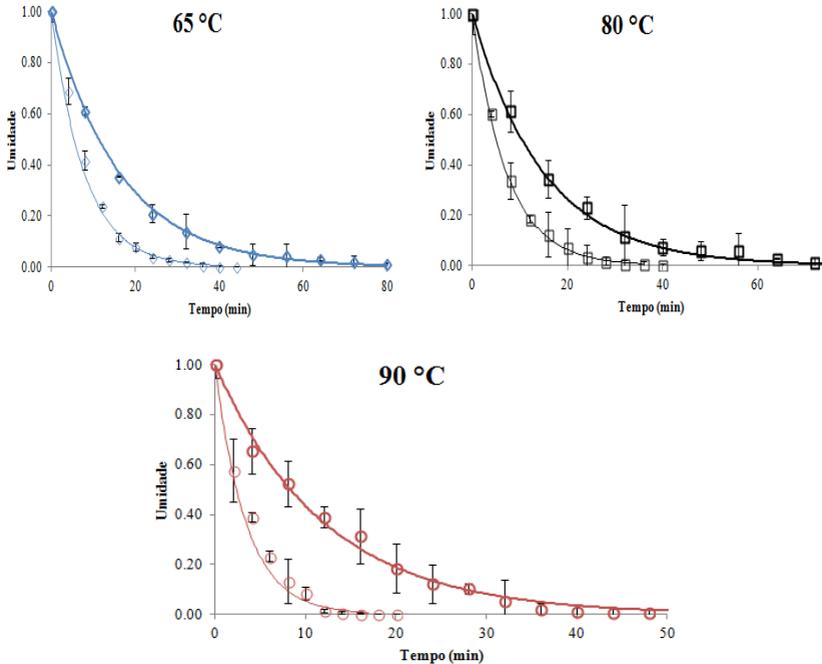


Figura 14 - Avaliação da influência do *gap* de espalhamento de 2 e 3 mm da polpa de açaí sobre o Mylar utilizado na curva de secagem adimensionalizada em relação à umidade da amostra *in natura*. Os pontos experimentais com os respectivos desvios-padrão e modelos – dados ajustados pelo modelo exponencial - representados com menor e maior largura estão relacionados às espessuras de 2 e 3 mm, respectivamente. As cores azul, preta e vermelha representam as temperaturas de 65, 80 e 90 °C, respectivamente.



Inicialmente, apesar de se verificar uma fase linear no decaimento da umidade vs tempo de secagem, foi realizada uma abordagem desconsiderando esse período para o ajuste de um modelo. Sendo assim, o modelo exponencial foi ajustado aos dados experimentais no decorrer de toda a secagem, sendo que a faixa dos valores obtidos para parâmetros do modelo para a triplicata das condições experimentais é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Intervalos dos valores dos parâmetros do modelo exponencial ajustado para as triplicatas experimentais das curvas de secagem da polpa de açaí nas temperaturas de 65, 80 e 90 °C nas espessuras do *gap* de espalhamento sobre o *Mylar* de 2 e 3 mm.

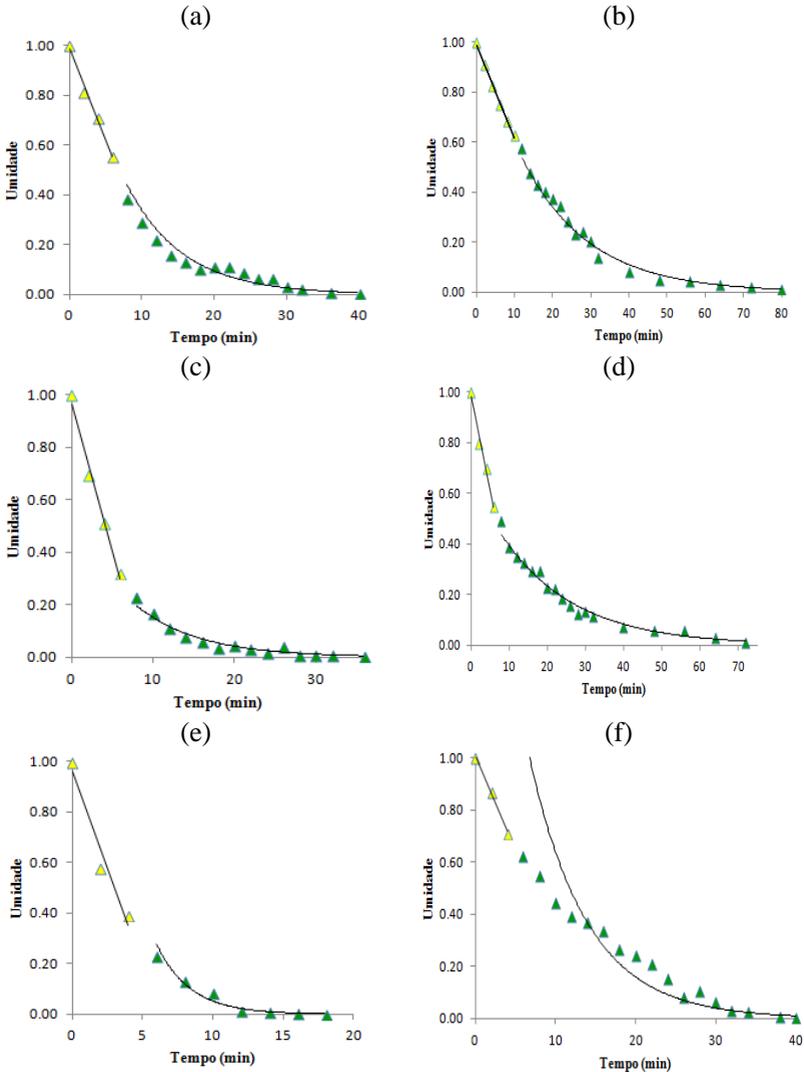
Temperatura (°C)	Espessura (mm)	a	b	R ² ajustado
65	2	4,240-4,874	(-0,141)-(-0,118)	0,995-0,998
	3	4,332-5,182	(-0,066)-(-0,055)	0,992-0,999
80	2	4,352-4,718	(-0,150)-(-0,130)	0,997-0,999
	3	4,276-4,696	(-0,069)-(-0,063)	0,996-0,998
90	2	4,189-4,861	(-0,328)-(-0,252)	0,984-0,996
	3	4,279-4,519	(-0,093)-(-0,079)	0,988-0,991

Ao se observar a Figura 13 nota-se que a evolução da umidade com o tempo para as temperaturas de 65 e 80 °C é similar para as duas espessuras de polpa.

Como esperado, as Figuras 13 e 14 demonstram que quanto menor a espessura da polpa e maior a temperatura da água circulante, mais rápida será a secagem do produto, resultado das menores resistências à transferência de calor e de massa na polpa e ao maior fluxo de energia fornecido pela água. Além disso, segundo Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) quanto maior a espessura da polpa, menor será a contribuição da energia radiante emitida pela água, devido à baixa capacidade de penetração da radiação infravermelha.

Pelo fato de ser observado nas Figuras 13 e 14 uma fase linear no início do decaimento da umidade vs tempo de secagem foi realizado um experimento comprobatório com retirada de pontos de 2 em 2 min nos primeiros 30 min de secagem para melhor visualização desse período. Os resultados obtidos estão expostos na Figura 15 com a divisão dos períodos na região de decaimento constante – modelo linear ajustado aos dados – e decrescente – modelo exponencial ajustado aos dados.

Figura 15 - Divisão do decaimento da umidade (adimensionalizada em relação à umidade inicial) nas regiões linear e decrescente - representados pelos ícones amarelos e verdes - juntamente com os modelos linear e exponencial ajustados aos dados, respectivamente. (a) 65 °C/2 mm; (b) 65 °C/3 mm; (c) 80 °C/2 mm; (d) 80 °C/3 mm; (e) 90 °C/2 mm; (f) 90 °C/3 mm.



A partir da análise dos dados apresentados na Figura 15, foram determinados os tempos de secagem do período de decaimento linear da umidade que podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Tempo de secagem da região de decaimento linear da umidade.

Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Tempo de secagem do decaimento linear da umidade (min)
65	2	6
	3	10
80	2	6
	3	6
90	2	4
	3	4

Os parâmetros dos modelos linear e exponencial ajustados a cada uma das condições estão apresentados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6- Parâmetros do modelo linear ajustado aos dados de umidade vs tempo de secagem no período linear.

Temperatura (°C)	Espessura (mm)	a	b	R ²
65	2	-0,0719	0,9862	0,9893
	3	-0,0372	0,9870	0,9938
80	2	-0,1112	0,9661	0,9847
	3	-0,0727	0,9807	0,9842
90	2	-0,1521	0,9610	0,9531
	3	-0,0721	1,0055	0,9957

Tabela 7 - Parâmetros do modelo exponencial ajustados aos dados de umidade vs tempo de secagem no período decrescente de secagem.

Temperatura (°C)	Espessura (mm)	a	b	R ²
65	2	1,2234	-0,128	0,9229
	3	1,0573	-0,057	0,9852
80	2	0,5489	-0,128	0,9357
	3	0,6621	-0,052	0,9684
90	2	3,4403	-0,419	0,9764
	3	2,5793	-0,139	0,8943

Como não há legislação específica ou critério geral para definição da umidade de um material particulado que possa ser denominado como pó, foi estabelecido como parâmetro para o final da secagem a umidade de 3 % em base úmida. Assim, os modelos ajustados foram utilizados para estimar o tempo para o final do processo de secagem, cujos os valores são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Tempo total de secagem (min) definido a partir dos modelos exponencial e de duas fases ajustados para cada condição experimental, considerando o final da secagem o produto com 3 % de umidade em base úmida.

Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Tempo de Secagem (min) - Exponencial	Tempo de Secagem (min) – Duas Fases
65	2	40	43
	3	83	80
80	2	36	45
	3	75	88
90	2	17	20
	3	60	67

Em relação ao tempo total de secagem calculado a partir do modelo de duas fases, observa-se que quanto maior a espessura do filme menor é a influência da fase linear no tempo total de secagem; com todos os valores variando entre 6 a 20 % do tempo total de secagem.

Observa-se que o aumento em 50 % na espessura do espalhamento acarretou no acréscimo de 2,1 vezes e 3,5 vezes no tempo total de secagem para as temperaturas da água de 65 e 80 °C, respectivamente, quando comparadas à secagem com a água a 90 °C.

Em relação ao efeito do aumento da temperatura da água de aquecimento, verifica-se que o aumento de 65 para 80 °C causou um decréscimo em 1,1 vezes no tempo total de secagem para ambas as espessuras analisadas, enquanto que de 80 para 90 °C a redução no tempo de secagem foi de 2,1 e 1,2 vezes para as espessuras de 2 e 3 mm, respectivamente. Em relação à elevação da temperatura de 65 para 90 °C nota-se uma redução de 2,4 e 1,4 vezes no tempo total de secagem para as espessuras de 2 e 3 mm, respectivamente.

Dessa forma, conclui-se que tanto a espessura de espalhamento da polpa de açaí como a temperatura de aquecimento da água circulante

interferem no tempo de secagem do produto. No entanto, quanto maior a espessura da polpa utilizada, menor será o efeito do aumento da temperatura da água, devido ao aumento da resistência à transferência de calor e de massa na polpa, como encontrado por Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) para polpa de manga filtrada.

Ao se avaliar de forma conjunta as duas condições mais extremas entre as apresentadas – 65 °C, 3 mm e 90 °C, 2 mm – observa-se uma redução de 4,9 vezes o tempo total de secagem.

Abonyi, Tang e Edwards (1999) observaram tempos de secagem de 75, 80 e 60,3 min para o purê de cenoura, de morango e de morango com 70 % de maltodextrina DE10, respectivamente, utilizando a temperatura da água de 95 °C e espessura de 1 mm. Ochoa-Martínez et al. (2012) observaram um aumento de 30 para 60 min no tempo de secagem ao secar fatias de manga por RW com 1 e 2 mm, respectivamente, e água à 92 °C como meio de aquecimento; enquanto que Herman-Lara et al. (2014) obtiveram tempos de 150 e 45 min para secagem de fatias de cenoura com 2 mm de espessura e temperatura da água de 74 e 94 °C em RW, respectivamente. Pavan (2010) relatou tempos de secagem entre 1 min e 15 s – 1 min 29 s para polpa de açaí descongelada em RW utilizando aquecimento de 94 °C (espessura não reportada).

Taxas de Secagem

O modelo exponencial foi ajustado para os dados experimentais da evolução temporal da umidade adimensional com o tempo usando o *software* Matlab. As taxas de secagem foram obtidas a partir da derivada da curva suavizada, mostradas nas Figuras 16 e 17.

Figura 16- Taxas de secagem da polpa de açaí espalhadas com *gap* de 2 (à esquerda) e 3 mm (à direita) obtidas a partir da derivada da curva suavizada aplicada ao modelo exponencial dos dados do decaimento da umidade vs tempo de secagem. As temperaturas de 65, 80 e 90 °C são representadas pelas cores azul, preta e vermelha, respectivamente.

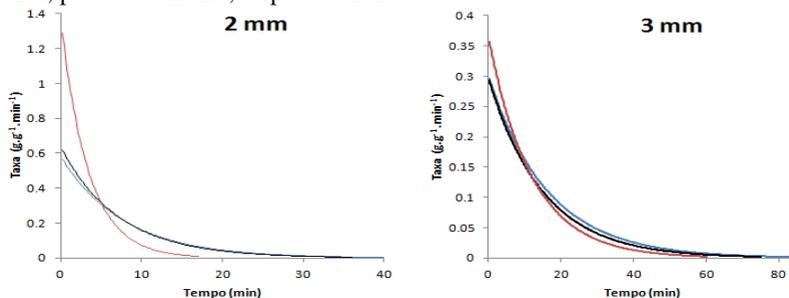
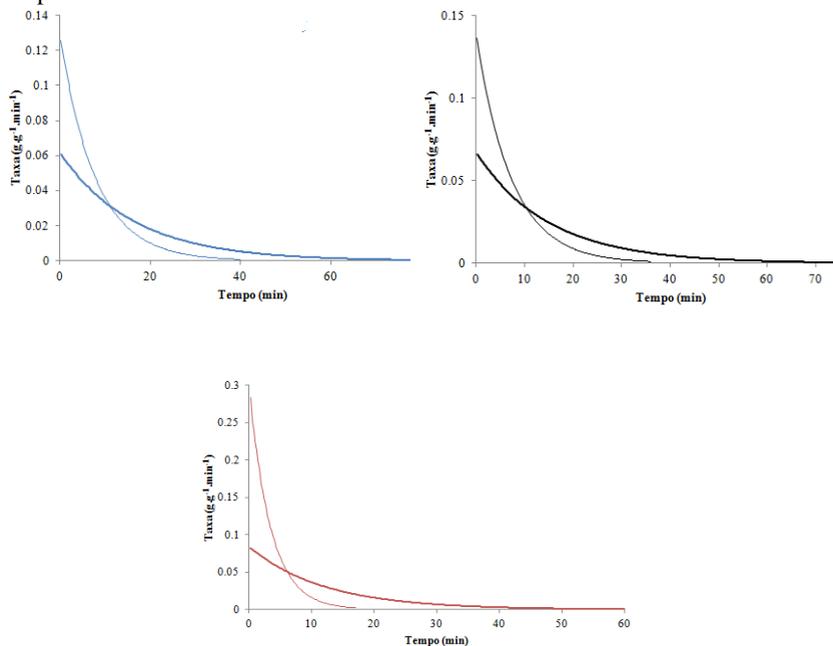


Figura 17- Taxas de secagem obtidas a partir da derivada das curvas suavizadas aplicada ao modelo exponencial dos dados do decaimento da umidade vs tempo de secagem nas temperaturas de 65, 80 e 90 °C, representadas pelas cores azul, preta e vermelha, respectivamente. A representação das linhas com menor e maior largura estão relacionados às espessuras do *gap* de 2 e 3 mm, respectivamente



Como pode ser observado na Figura 16 as taxas de secagem que se iniciam superiores para condições a 2 mm em relação às de 3 mm, se tornam inferiores ao longo do tempo de secagem. Isso ocorre em função da menor resistência a transferência de calor e de massa, que facilita a retirada de umidade do produto no início. Sendo assim, o teor de água se reduz rapidamente e passa a ser necessária mais energia para a retirada de umidade do interior da polpa, que ocorre por difusão. Assim como na evolução da umidade com o tempo, observa-se pela Figura 17 que o efeito da temperatura da água de aquecimento é reduzido com o aumento da espessura da polpa espalhada, em função do aumento nos fenômenos relacionados à condução e à radiação; embora os valores de transferência de calor pela radiação sejam praticamente mínimos.

O modelo de duas fases também foi ajustado para os dados experimentais da evolução temporal da umidade adimensional com o tempo usando o *software* Matlab. Sendo assim, as taxas de secagem foram divididas entre o período de taxa constante (Tabela 9) e de taxa decrescente obtidas a partir da derivada da curva suavizada, mostradas nas Figuras 18 e 19.

Tabela 9 - Taxa constante obtida pela derivada da curva suavizada ajustada pelo modelo de duas fases no período de decaimento linear da umidade vs tempo de secagem.

Temperatura (°C)	Espessura do Filme (mm)	Taxa Constante (g g ⁻¹ min ⁻¹)
65	2	0,0816 ± 0,0155
	3	0,0379 ± 0,0016
80	2	0,1078 ± 0,0330
	3	0,0715 ± 0,0174
90	2	0,1504 ± 0,0425
	3	0,0629 ± 0,0050

Figura 18 - Taxas de secagem da polpa de açaí espalhadas com *gap* de 2 (à esquerda) e 3 mm (à direita) obtidas a partir da derivada da curva suavizada do modelo de duas fases aplicado para o decaimento da umidade (adimensionalizada em relação à amostra inicial) vs tempo. As temperaturas de 65, 80 e 90 °C são representadas pelas cores azul, preta e vermelha, respectivamente. A parte tracejada e contínua das curvas representam os períodos de tava constante e decrescente, respectivamente.

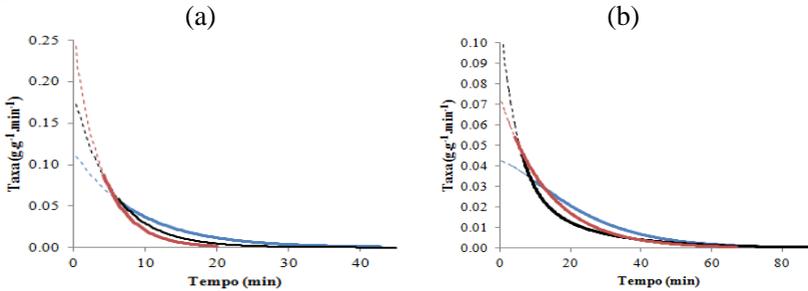
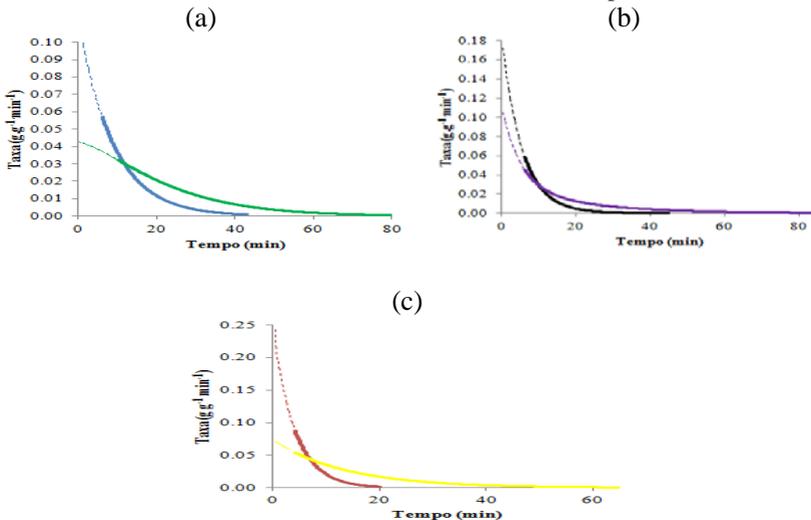


Figura 19 - Taxas de secagem obtidas a partir da derivada das curvas suavizadas do modelo de duas fases aplicado no decaimento da umidade (adimensionalizada em relação à amostra inicial) nas temperaturas de (a) 65 – 2 mm (azul) e 3 mm (verde); (b) 80 – 2 mm (preto) e 3 mm (roxo); e (c) 90 °C – 2 mm (vermelho) e 3 mm (amarelo). A representação das linhas tracejada e contínua está relacionada à taxa constante e decrescente, respectivamente.



Ao se comparar as Figuras 16 e 18, observa-se que a secagem da polpa de açaí no *cast-tape drying* seria considerada diretamente em período decrescente pelo modelo exponencial em função do curto tempo da fase linear da taxa em relação ao tempo total de secagem. No entanto, analisa-se que apesar de pequeno, a redução da umidade nesse período não deve ser negligenciada, e por isso, o modelo de duas fases representaria de forma mais adequada o perfil de secagem do decaimento da umidade com o tempo. Moraes (2013) relatou também duas fases de secagem para filmes de amido-glicerol-fibras de celulosa em *tape-casting* utilizando a temperatura de secagem em estufa de 40 e 70 °C com velocidade de espalhamento de 50, 150 e 250 cm.min⁻¹, aonde a primeira apresentou taxa constante – por aproximadamente metade do tempo total de secagem - e a segunda taxa decrescente. Esse comportamento foi diferente da secagem de polpa de manga e de tomate apresentadas por Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) e por Castoldi et al. (2014) - respectivamente, que apresentam taxa constante em RW.

O fato das taxas de secagem apresentarem comportamento decrescente após os primeiros minutos de secagem ($t < 10$ min), apesar da umidade inicial elevada (81 %), pode ser justificado pela formação de uma película superficial na polpa de açaí – representada na Figura 20 - que dificulta a retirada de umidade pela convecção forçada na superfície e a difusão da água no interior da polpa. O acúmulo de vapor dentro da camada de açaí espalhada gera uma pressão interna que rompe a película superficial em determinados pontos, o que acarreta na formação de rachaduras que agem como caminhos preferenciais para a saída de vapor.

Figura 20- Imagens da secagem da polpa de açaí a 90 °C e 3 mm em diferentes tempos de secagem.

(a) Logo após o espalhamento

(b) 1 min

(c) 2 min



(d) 3 min

(e) 6 min

(f) 21 min



A sequência de imagens na Figura 20 permite observar que após 2 min de secagem a estrutura superficial da polpa de açaí se apresenta modificada em relação ao momento seguinte ao espalhamento. Os vincos na polpa se suavizam com a secagem do produto devido à redução da quantidade de vapor com o tempo - proveniente do decréscimo do gradiente de concentração de água entre o interior e a superfície da polpa - assim como a redução da espessura pela própria secagem do produto. O comportamento representado pela Figura 20 ocorre para todas as condições de temperatura e espessuras estudadas, sendo que os vincos são mais explícitos para os experimentos a 3 mm. Além disso, quanto maior foi a temperatura da água utilizada, mais rápido foi o surgimento dessa película.

Uma possível justificativa para a formação da película é a desnaturação das proteínas em função da alta temperatura de forma a tornar-se uma barreira física a transferência de calor e de massa. O aumento da energia e da temperatura modifica a estabilidade da proteína, em função do calor interferir principalmente nas interações

como as pontes de hidrogênio, além de alterar os grupos hidrofóbicos presentes na solução aquosa (SEHN, 2009). Sendo assim, película é diretamente afetada pela temperatura utilizada para aquecer a polpa, uma vez que quanto maior a energia térmica fornecida, mais rapidamente ocorre o rompimento das ligações que mantêm a conformação das proteínas. Segundo Fennema (1993) a velocidade de desnaturação proteica pode aumentar em até 600 vezes a cada 10 °C em um intervalo de temperatura típico de desnaturação, dependendo da proteína.

Para avaliar a influência da temperatura na formação desta película, foi realizado um experimento no *cast-tape drying* com espessura de espalhamento da polpa de açaí de 3 mm com a temperatura da água de $21,2 \pm 0,7$ °C. Verificou-se que não houve a formação da película, mesmo com a redução da umidade de $4,0429 \pm 0,1987$ g g⁻¹ para $2,2289 \pm 0,1882$ g g⁻¹ após 3h 30 min de experimento. As imagens estão apresentadas no Anexo B, aonde se observa uma desidratação superficial homogênea após as 3 h 30 min, mas sem a formação de uma película.

Esse efeito não foi observado, por exemplo, na secagem da polpa de manga filtrada (ZOTARELLI, 2014), pois a matéria-prima utilizada apresentou 0,72 g de proteínas a cada 100 g (em base úmida), valor inferior a 50 % do apresentado para polpa de açaí (1,82 g de por 100 g – em base úmida), possivelmente resultando na diferença no comportamento das taxas de secagem apresentadas.

Com a formação da película, a pressão interna do vapor faz com que ocorra o aparecimento de rachaduras, que se tornam caminhos preferenciais para a saída do vapor, sendo então necessário que a água migre do interior da polpa para essas regiões, o que contribui para os elevados tempos de secagem indicados na Tabela 8.

Abonyi, Tang e Edwards (1999) encontraram o mesmo comportamento de taxa decrescente na secagem de purês de cenoura e de morango com 70 % de maltodextrina (DE10) por RW utilizando a temperatura da água de aquecimento de 95 °C e espessura de espalhamento de 1 mm. Segundo Geankoplis (1993) vários alimentos e materiais fibrosos como vegetais podem desenvolver uma camada impermeável ao fluxo de líquido e de vapor na sua superfície quando tratados com elevadas temperaturas pela formação de agregados de células que se encolhem pelo efeito da temperatura.

Capacidade Evaporativa (CE)

A evolução da capacidade evaporativa vs umidade da polpa - adimensionalizada em relação a umidade da polpa *in natura* (b.s.) - foi avaliada de acordo com os modelos exponencial e de duas fases, apresentados nas Figuras 21 e 22, respectivamente.

Figura 21- Capacidade evaporativa em função da umidade adimensionalizada (em relação à amostra *in natura*), determinada a partir do modelo exponencial ajustado para o decaimento da umidade vs tempo de secagem. As linhas azul, preta e vermelha estão relacionadas às temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C, respectivamente. A menor e a maior espessuras estão associadas ao *gap* de 2 e 3 mm, respectivamente.

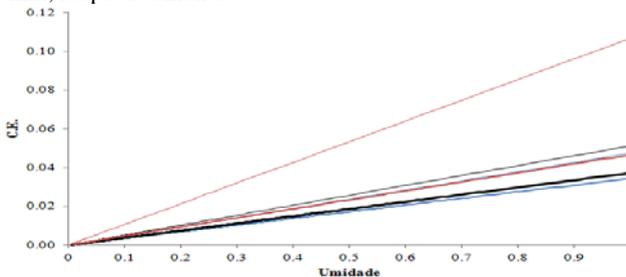
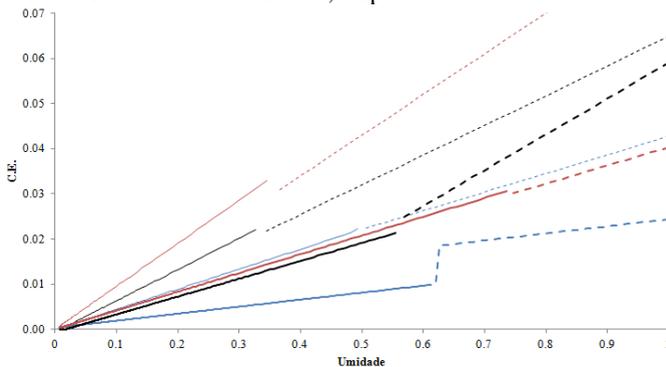


Figura 22- Capacidade evaporativa em função da umidade adimensionalizada (em relação à amostra *in natura*), determinada a partir do modelo de duas fases ajustado para o decaimento da umidade vs tempo de secagem. As linhas azul, preta e vermelha estão relacionadas às temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C, respectivamente. A menor e a maior espessuras estão associadas ao *gap* de 2 e 3 mm, respectivamente. E as linhas pontilhadas e contínuas estão associadas às fases linear e decrescente, respectivamente.



Observa-se que em todos os casos a capacidade evaporativa decai linearmente com a umidade. A diferença entre os resultados apresentados nas Figuras 21 e 22, consiste na variação na taxa de secagem ao passar do período constante para o decrescente pelo modelo de duas fases.

É possível analisar que quanto maior a temperatura de aquecimento e menor espessura do filme utilizadas, mais brusco é o decaimento da capacidade evaporativa em função da umidade da polpa, com exceção da condição de 80 °C/3 mm com o modelo de duas fases (Figura 22) que apresentou uma capacidade evaporativa superior no período constante em relação as demais condições a 3 mm.

De forma geral, os resultados obtidos pelos dois modelos apresentaram o mesmo comportamento, em função do período de decaimento constante da umidade vs tempo ser curto em relação ao tempo total de secagem. Os parâmetros da função linear ajustada para a capacidade evaporativa vs umidade adimensionalizada estão indicadas nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Parâmetros do modelo linear ajustado para os dados da capacidade evaporativa vs umidade, determinados pelo modelo exponencial.

Temperatura (°C)	Espessura (mm)	a	b	R ²
65	2	0,0473	(-6.10 ⁻¹⁸)	1,000
	3	0,0344	(-4.10 ⁻¹⁷)	1,000
80	2	0,0513	5.10 ⁻¹⁷	1,000
	3	0,0372	(-2.10 ⁻¹⁷)	1,000
90	2	0,1068	(-4.10 ⁻¹⁷)	1,000
	3	0,0466	2.10 ⁻¹⁷	1,000

Tabela 11 - Parâmetros do modelo linear ajustado para os dados da capacidade evaporativa vs umidade, determinados pelo modelo de duas fases.

Condição		Período Constante			Período Decrescente		
T (°C)	Gap (mm)	a	b	R ²	a	b	R ²
65	2	0,0413	0,0015	1,0	0,0434	(-3.10 ⁻¹⁸)	1,0
	3	0,0156	0,0088	0,757	0,0309	0,0088	1,0
80	2	0,0658	-0,001	1,0	0,0692	-0,0006	1,0
	3	0,0793	-0,020	1,0	0,0396	-0,0007	1,0
90	2	0,0900	-0,002	1,0	0,0954	(-2.10 ⁻¹⁷)	1,0
	3	0,0404	5.10 ⁻⁶	1,0	0,0416	1.10 ⁻⁶	1,0

Ao se analisar os valores dos parâmetros obtidos pelo modelo linear (Tabelas 10 e 11), constata-se que a capacidade evaporativa como função da umidade pode ser bem representada pelos dados do modelo exponencial, uma vez que são similares aos encontrados para o período decrescente do modelo de duas fases. Apenas as condições de 65 e 80 °C a 3 mm apresentaram coeficientes angulares da reta diferentes entre o período constante e decrescente.

O valor médio, ao longo de todo o processo de secagem, para a capacidade evaporativa está apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Capacidade evaporativa média das condições de 65, 80 e 90 °C nas espessuras de 2 e 3 mm.

Análise Condição	CE (kg.m ⁻² .h ⁻¹)	
	2 mm	3 mm
65 °C	2,01 ± 0,09 ^{b,A}	1,20 ± 0,13 ^{b,B}
80 °C	2,84 ± 0,42 ^{b,A}	1,44 ± 0,06 ^{b,B}
90 °C	7,05 ± 2,79 ^{a,A}	3,69 ± 0,55 ^{a,B}

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

As capacidades evaporativas médias são superiores para as condições que utilizaram a espessura da polpa de 2 mm em relação à espessura de 3 mm, em 67,5, 97,2 e 91,1 % para as temperaturas de 65, 80 e 90 °C, respectivamente. As temperaturas de aquecimento de 65 e 80 °C não influenciaram na CE, em função da evolução temporal da umidade da polpa ser similar como mostrado na Figura 13.

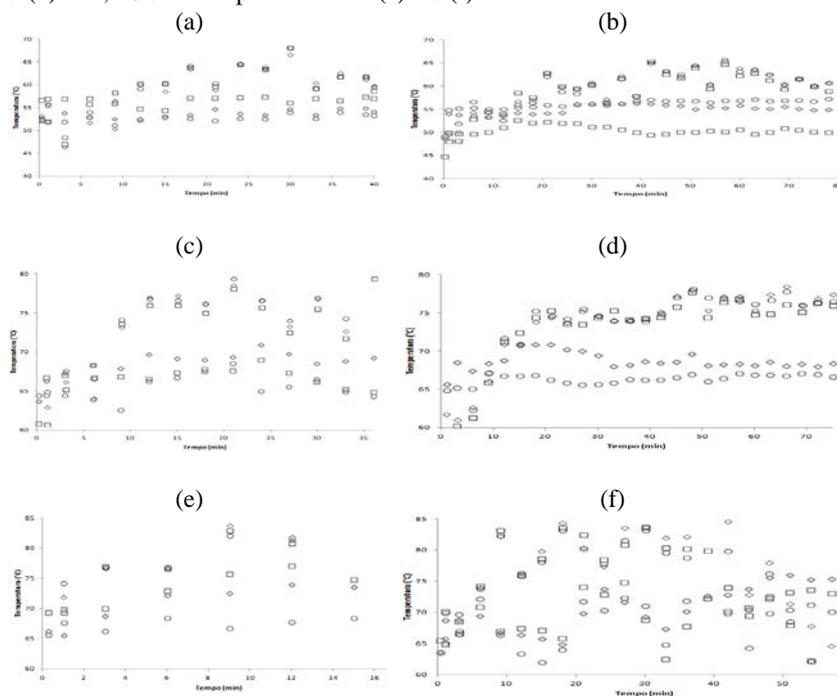
Os valores apresentados pela polpa de açaí são inferiores aos encontrados por Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) para polpa de manga – 5,21 e 8,81 kg.m⁻².h⁻¹ para a espessura de 2 mm; e de 4,62 e 4,91 kg.m⁻².h⁻¹ para 3 mm - nas temperaturas de 75 e 85 °C, respectivamente. Nindo et al. (2003) determinaram a capacidade evaporativa de secagem de purê de abóbora, com 11 % de maltodextrina, por RW, em escala piloto, de 10 kg.m⁻².h⁻¹ e 3,1 a 4,6 kg.m⁻².h⁻¹ para a secagem do produto em sistemas contínuos utilizando uma temperatura de aquecimento de 95 °C e uma espessura

de espalhamento entre 0,4 e 0,6 mm. Segundo o estudo de Abonyi, Tang e Edwards (1999) a CE para o RW contínuo foi de $6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ para os purês de cenoura e de morango com a temperatura da água de $95 \text{ }^\circ\text{C}$ e espalhamento de 1 mm.

4.3 EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA

As evoluções temporais da temperatura da polpa em todas as condições avaliadas, determinadas pela termografia e pelos termopares estão representadas na Figura 23.

Figura 23- Evolução temporal da temperatura da polpa de açaí analisada por meio das termografias e dos termopares, representados pelos pontos de cor preta e cinza, respectivamente. Símbolos iguais representam a avaliação da temperatura no mesmo ponto do espalhamento. São indicadas as temperaturas de $65 \text{ }^\circ\text{C}$ e espessuras de 2 (a) e 3 (b) mm; $80 \text{ }^\circ\text{C}$ e espessuras de 2 (c) e 3 (d) mm; e $90 \text{ }^\circ\text{C}$ e espessuras de 2 (e) e 3 (f) mm.



A diferença média entre as temperaturas analisadas pelos dois métodos é igual ou inferior a 5 °C, com exceção da condição de 80 °C e 3 mm. Esse resultado é condizente com o encontrado por Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) para polpa de manga a 95 °C e 2 mm.

Os valores superiores obtidos pelas termografias em relação aos termopares podem ser justificados pela redução da espessura da polpa com o processo de secagem, alterando a região de medições dos termopares. O aumento da temperatura inicial da polpa é rápido em comparação com o tempo total de secagem, permanecendo constante após esse período.

A temperatura média da polpa ficou em torno de 55, 70 e 72 °C para as condições de temperatura da água de aquecimento de 65, 80 e 90 °C, respectivamente. Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) encontraram uma faixa de temperatura de 70 – 75 °C para a polpa de manga seca por RW, ao se utilizar água a 95 °C e espessura de 2 mm; enquanto que Abonyi, Tang e Edwards (1999) obtiveram a variação de temperatura para o purê de cenoura seco por RW entre 60 – 70 °C com o aquecimento a 95 °C e 1 mm. Castoldi et al. (2014) encontraram temperatura média de 70 °C para polpa de tomate em secagem por RW a 95 °C e 3 mm; valor semelhante ao relatado por Nindo et al. (2003) para purê de abóbora adicionado com 11 % de maltodextrina por RW a 90 °C e 0,65 mm. Pavan (2010) observou uma variação de 62 – 71 °C na temperatura de polpa de açaí utilizando a temperatura da água de 94 °C.

Não foi observado o fenômeno de resfriamento evaporativo - que consiste na redução da temperatura da polpa devido à evaporação da água na superfície - em nenhuma das condições. Isso pode ser justificado pelo fato das taxas de secagem serem baixas durante todo o período, devido a uma dificuldade de migração da água na polpa, o que gera uma evaporação lenta com manutenção da temperatura.

As imagens termográficas e a evolução temporal registrada com os termopares (distribuídos na polpa e na água aquecida) para todos os experimentos realizados no presente estudo encontram-se no Anexo C.

4.4 FLUXO DE CALOR

Os fluxos de calor médio condutivo e de radiação estimados pelas Equações 12 e 13, assim como a contribuição da energia radiante em relação ao calor total estimado, para cada condição experimental, estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Fluxo de calor médio estimado por condução e por radiação através do *Mylar*; e a contribuição da radiação para a secagem frente ao calor total transferido para as condições a 65, 80 e 90 °C nos *gaps* de espalhamento de 2 e 3 mm.

Temperatura (°C)	q_{cond} (W.m ⁻²)	q_{rad} (W.m ⁻²)	Radiação (%)
65	6000	83,9	1,38
80	6000	95,7	1,57
90	10800	181,5	1,65

As resistências à transferência de calor por condução e por radiação através no *Mylar* estimadas pelas Equações 14 e 15, considerando a temperatura de aquecimento (T_b) como a da interface água-*Mylar* e a temperatura da interface *Mylar*-polpa como sendo a temperatura média da polpa (T_i) estão indicadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores estimados para as resistências condutiva e de radiação à transferência de calor através do *Mylar* considerando a temperatura da interface água-*Mylar* (T_b) como a temperatura de aquecimento e a temperatura da interface *Mylar*-polpa (T_i) como a temperatura da polpa.

T_b (K)	T_i (K)	$R_{m,k}$ (m ² .K.W ⁻¹)	$R_{m,r}$ (m ² .K.W ⁻¹)
338,15 (65 °C)	328,15 (55 °C)		0,120
353,15 (80 °C)	343,15 (70 °C)	1,67.10 ⁻³	0,104
363,15 (90 °C)	345,15 (72 °C)		0,099

Os valores obtidos para os fluxos de calor médio condutivo e de radiação mostram que o mecanismo de transferência de calor limitante da secagem por CTD é a condução. Como esperado, o aumento da temperatura, afetou positivamente os dois mecanismos de transferência de calor, em função da maior energia térmica fornecida ao sistema pela água circulante.

Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) demonstraram que quanto maior a espessura de polpa utilizada, menor será a influência da radiação infravermelha durante a secagem devido à baixa capacidade de penetração dessa radiação. Dessa forma, em espessuras de filme maiores, a influência da radiação na elevação da temperatura da polpa é ainda menor. No entanto, isso não foi evidenciado no presente estudo, aonde a temperatura da polpa não ter apresentou uma dependência com a espessura do filme utilizada.

A resistência condutiva consistiu em 1,37; 1,58 e 1,65 % - nas temperaturas da água de 65, 80 e 90 °C, respectivamente - da resistência

total do sistema, devido – principalmente – à pequena espessura do filme *Mylar* utilizado. A diferença nas ordens de grandeza entre as resistências condutiva e de radiação justifica o processo consistir em uma secagem condutiva.

A contribuição máxima da radiação observada foi inferior a 2 % para todas as condições estudadas. Esse resultado é condizente com os valores inferiores a 3 % reportados por Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) para a secagem com taxa constante de polpa de manga em RW, com temperatura da água a 95 °C e da polpa a 75 °C. Também condiz com o trabalho de Ortiz-Jerez et al. (2015), cujos valores encontrados foram em torno de 1 % à partir do cálculo comparativo entre o calor total fornecido pela água de aquecimento e a contribuição da radiação e da condução para o calor total que atravessou o filme *Mylar*, em um estudo utilizando água à 90 °C para secagem de fatias de abóbora em *Conductive Hydro-Drying*.

Isso contradiz o princípio do funcionamento do equipamento RW, que é baseado na transmissão de calor pela radiação infravermelha como mecanismo importante na secagem dos produtos em relação a outros métodos de secagem. Esses valores foram determinados desconsiderando as perdas de calor para o ambiente e considerando que toda a radiação emitida pela água quente é transmitida pelo *Mylar* e atinge a polpa. Sendo assim, segundo Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) menos de 50 % da radiação térmica emitida pela água realmente contribui para a secagem da polpa.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS PÓS

4.5.1 Umidade e atividade de água

Os valores de umidade e de atividade de água dos pós de açaí produzidos utilizando os tempos de secagem em CTD utilizando os tempos determinados na Tabela 8 e do pó liofilizado estão apresentados nas Tabelas 15 e 16, respectivamente.

Tabela 15 - Umidade em base úmida e em base seca dos pós produzidos em CTD para as condições de temperatura de aquecimento de 65, 80 e 90 °C e *gaps* de espalhamento de 2 e 3 mm e do pó obtido por liofilização.

Processo	Umidade (%)		Umidade (g.g ⁻¹)	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
65 °C	2,62±0,05 ^{a,B}	4,61±0,08 ^{a,A}	0,0269±0,0005	0,0484±0,0009
80 °C	1,60±0,01 ^{b,B}	3,20±0,09 ^{b,A}	0,0163±0,0001	0,0330±0,0010
90 °C	0,76±0,01 ^{c,B}	1,90±0,08 ^{c,A}	0,0077±0,0001	0,0194±0,0008
Liofilização	3,06 ± 0,03		0,0316±0,0003	

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

Tabela 16 - Atividade de água dos pós produzidos em CTD para as condições de temperatura de aquecimento de 65, 80 e 90 °C e *gaps* de espalhamento de 2 e 3 mm e do pó obtido por liofilização.

Processo	a _w	
	2 mm	3 mm
65 °C	0,392±0,007 ^{a,B}	0,547±0,010 ^{a,A}
80 °C	0,282±0,010 ^{b,B}	0,491±0,002 ^{b,A}
90 °C	0,250±0,015 ^{c,B}	0,355±0,006 ^{c,A}
Liofilização	0,366±0,002	

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

Como a a_w é proporcional à quantidade de água livre no produto, existe uma relação direta como valor da umidade, sendo que a a_w apresenta-se como um fator mais importante para se determinar a estabilidade de um produto (RAHMAN; LABUZA, 2007).

Os valores de a_w encontrados são superiores à 0,240 reportado por Pavan, Schimidt e Feng (2012) para pós de açaí com 2,19 % de umidade.

Um produto pode ser considerado microbiologicamente estável ao apresentar a_w inferior a 0,6, pois esse valor inibe o crescimento de bactérias patogênicas, leveduras e fungos; que necessitam de a_w superiores a 0,85; 0,80 e 0,62, respectivamente. No entanto, as reações químicas e enzimáticas podem ocorrer em a_w de 0,2, pois nesse caso a

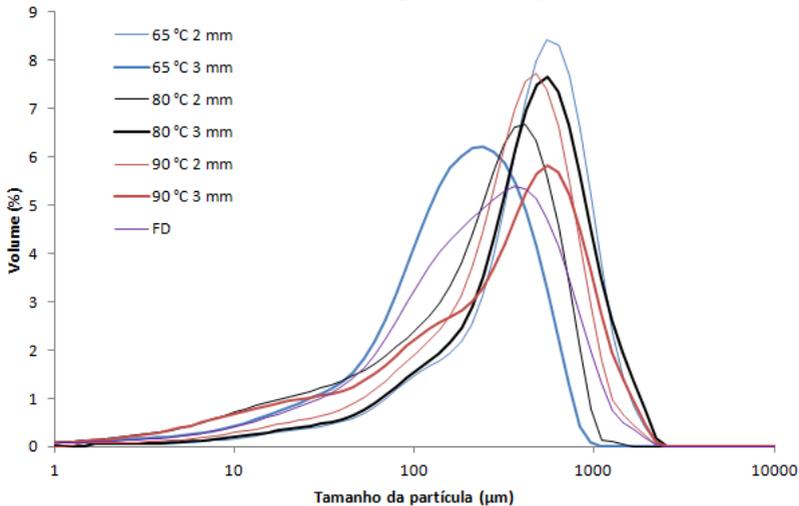
quantidade de água adsorvida na superfície e nos capilares permite que a água atue como solvente (RAHMAN; LABUZA, 2007).

4.5.2 Distribuição do tamanho de partículas

A Figura 24 apresenta a distribuição do volume ocupado em relação ao tamanho equivalente da partícula. Nota-se que o volume das partículas apresenta uma distribuição monomodal, indicando a predominância de uma faixa de tamanho de partícula. Isso pode ser devido a moagem a que os pós foram submetidos.

Zotarelli (2014) relatou um comportamento monomodal para os pós de manga produzidos a partir do RW – com e sem adição de maltodextrina – e do liofilizado devido à moagem dos filmes em moinho de facas. Tonon, Brabet e Hubinger (2008) encontraram uma distribuição bimodal para pós de açaí produzidos com diferentes concentrações de maltodextrina, assim como Zotarelli (2014) para pós de manga com e sem maltodextrina, ambos os estudos em *spray-drying*, em função de o equipamento possuir um bico aspersor que produz partículas esféricas.

Figura 24- Distribuição do tamanho de partícula dos pós.



O diâmetro de Brouckere está relacionado ao diâmetro médio das partículas maiores presentes na amostra e pode ser analisado na Tabela 17. BARBOSA-CÁNOVAS et al. (2005) consideram um

material particulado como pó quando o tamanho médio das partículas for menor que 1 mm.

Tabela 17 - Diâmetro de Brouckere - D[4,3] – dos pós produzidos em CTD a partir das condições de 65, 80 e 90 °C nas espessuras de 2 e 3 mm e para o pó liofilizado.

Processo	Diâmetro Médio D[4,3] (µm)	
	2 mm	3 mm
CTD		
65 °C	486,1 ± 69,2 ^{a,A}	205,3 ± 14,6 ^{c,B}
80 °C	263,8 ± 19,7 ^{c,B}	483,2 ± 49,0 ^{a,A}
90 °C	382,6 ± 37,5 ^{b,A}	384,7 ± 78,1 ^{b,A}
Liofilização	297,60 ± 49,20	

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

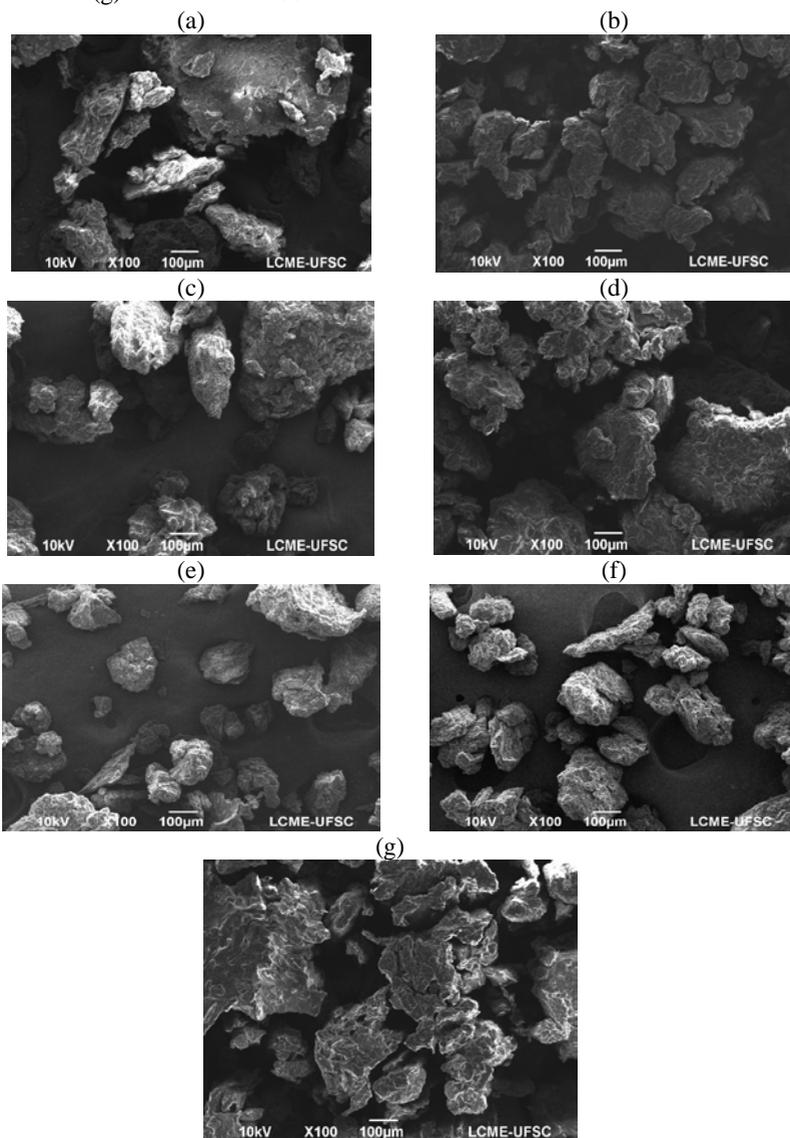
O diâmetro médio das partículas não apresenta tendência relacionada ao aumento da temperatura da água ou da espessura da polpa utilizadas na secagem por CTD. As diferenças encontradas podem ser justificadas pelo processo de moagem, que apresentam como interferentes a velocidade e o tempo das facas do moinho em contato com o produto, além da massa utilizada em cada batelada e a ausência do sistema de agitação no peneiramento, o que reduz a padronização do tamanho das partículas entre os processos.

Pavan, Schmidt e Feng (2012) obtiveram açai em pó pelos métodos de liofilização, RW e convecção; utilizando um moinho de café para a moagem posterior ao processamento. O diâmetro médio relatado por esses autores apresentou uma faixa entre 425 – 600 µm.

4.5.3 Microestrutura dos pós

A microestrutura das partículas avaliada pela microscopia eletrônica de varredura com aumento de 100 vezes para as condições estudadas está apresentada na Figura 25.

Figura 25 - Morfologia dos pós de açaí resultantes das secagens a 65 °C – 2 (a) e 3 (b) mm; 80 °C – 2 (c) e 3 (d) mm; 90 °C – 2 (e) e 3 (f) mm; e para o pó liofilizado (g). Aumento de 100x em MEV.



Conforme descrito por Barbosa-Cánovas et al. (2005) o termo “diâmetro” do pó se refere à dimensão linear característica das partículas, uma vez que alimentos particulados apresentam diferentes formas e graus de irregularidade em função da sua complexa estrutura, como apresentado pela Figura 25.

As imagens com medições do diâmetro de partículas, aleatórias, para os pós obtidos nas condições de secagem investigadas no presente estudo podem ser analisadas no Anexo D.

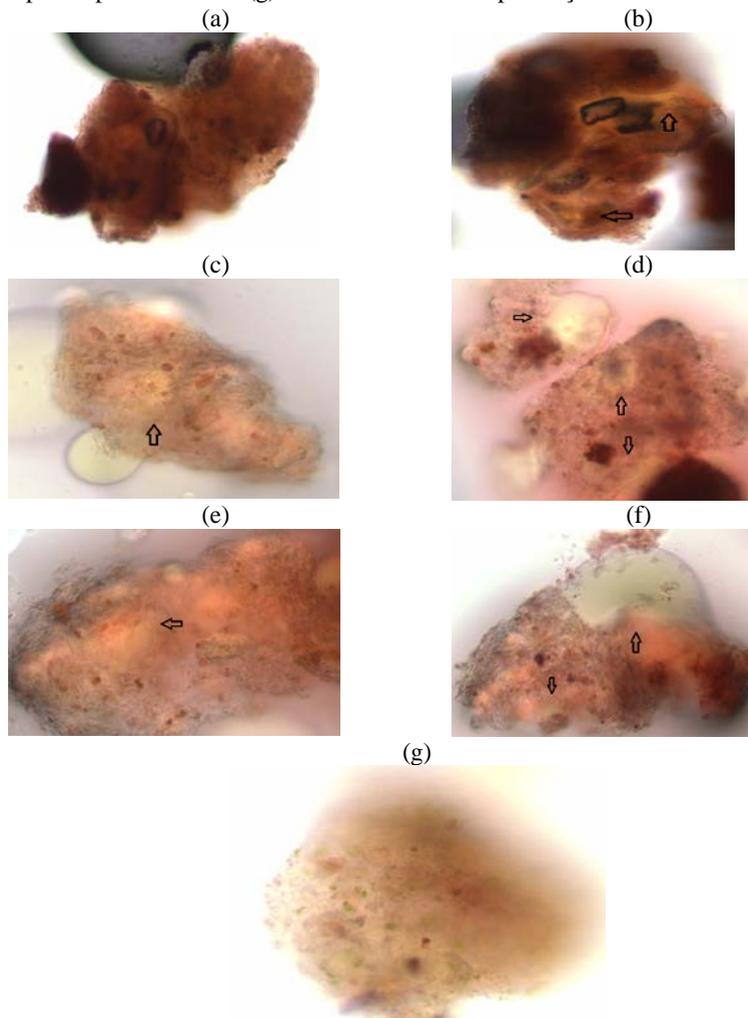
Os pós de açaí produzidos em CTD exibiram variados tamanhos de partículas com superfície irregular e rugosa. Segundo Caparino et al. (2012) pós que possuem como característica uma superfície escamosa, apresentam uma menor área superficial em relação às partículas esféricas – características dos pós produzidos por *spray-drying* - reduzindo assim a suscetibilidade à oxidação de compostos, fato importante para produtos com elevado conteúdo lipídico como o açaí.

Os pós obtidos por liofilização foram mais porosos que os demais, consequência da sublimação do gelo presente no material, protegendo a estrutura primária e o formato do produto, resultando em uma diferença insignificante no volume (RATTI, 2001). Esse comportamento foi semelhante ao descrito por Caparino et al. (2012) e Zotarelli (2014) para pós de manga liofilizadas.

As morfologias dos pós obtidos no presente estudo diferem das apresentadas por trabalhos que utilizam o *spray-drying*. Isso pode ser exemplificado pelas imagens reproduzidas para pós de açaí (TONON; BRABET; HUBINGER, 2008), para pós de manga (ZOTARELLI, 2014; CAPARINO et al., 2012) e para pós de suco de fruta de *Opuntia stricta* (OBÓN et al., 2009). Esses estudos apresentaram partículas com formatos esféricos resultantes do processo de secagem por *spray-drying*, com superfície lisa ou rugosa dependendo da temperatura de secagem utilizada. Segundo Tonon, Brabet e Hubinger (2008) a diferença entre as morfologias dos pós obtidos em diferentes temperaturas em *spray-drying* surgiram das características físicas da superfície da partícula, que pode ser elástica e colapsada – quando temperaturas baixas e intermediárias são utilizadas – ou rígidas e porosas – quando utilizadas altas temperaturas.

As micrografias dos pós de açaí obtidos pelas diferentes condições avaliadas foram registradas com o auxílio de um microscópio óptico e estão apresentadas na Figura 26.

Figura 26 - Microscopia óptica dos pós de açaí obtidos pelas secagens a 65 °C – 2 (a) e 3 (b) mm; 80 °C – 2 (c) e 3 (d) mm; 90 °C – 2 (e) e 3 (f) mm por CTD e para o pó liofilizados (g). As setas destacam a presença do óleo nas imagens.



As imagens apresentadas na Figura 26 demonstram que o óleo – indicado pelas setas – permaneceu ligado nas partículas dos pós. Segundo Nijdam e Langrish (2006) temperaturas maiores de secagem favorecem o acúmulo de óleo na superfície dos pós, gerando uma maior susceptibilidade à oxidação e, subsequente, rancidez no produto. As

moléculas de óleo não são visualizadas de forma explícita para o pó liofilizado, provavelmente devido a menor ruptura da estrutura, característica do processo.

O formato irregular apresentado na Figura 25 observado em MEV corrobora com as imagens obtidas pela microscopia óptica indicadas na Figura 26.

4.5.4 Massa específica e porosidade

As massas específicas aparente e real são apresentadas na Tabela 18. A porosidade do leito calculado pela Equação 23 para cada condição estudada é apresentado na Tabela 19.

Tabela 18 - Massa específica aparente e real dos pós produzidos em CTD nas temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C e nos *gaps* de espalhamento de 2 e 3 mm e o do pó liofilizado.

Processo	ρ_{ap} (g.cm ⁻³)		ρ_{real} (g.cm ⁻³)	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
CTD				
65 °C	0,45±0,00 ^{a,A}	0,43±0,00 ^{b,B}	1,19±0,00 ^{b,B}	1,22±0,00 ^{a,A}
80 °C	0,41±0,01 ^{c,A}	0,42±0,00 ^{c,A}	1,16±0,00 ^{c,B}	1,17±0,00 ^{b,A}
90 °C	0,43±0,00 ^{b,B}	0,45±0,00 ^{a,A}	1,21±0,00 ^{a,A}	1,15±0,00 ^{c,B}
Liofilização	0,33 ± 0,00		1,1693±0,0003	

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

Tabela 19 – Porosidade do leito de partículas de pós produzidos em CTD nas temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C e nos *gaps* de espalhamento de 2 e 3 mm e o do pó liofilizado.

Processo	Porosidade do Leito	
	2 mm	3 mm
CTD		
65 °C	0,62	0,65
80 °C	0,65	0,65
90 °C	0,64	0,61
Liofilização	0,72	

A massa específica aparente é menor que a real em todas as condições, pelo fato da primeira considerar os espaços vazios entre as partículas. A porosidade representa o percentual desse volume intergranular existente em cada amostra. Segundo Tonon, Brabet e

Hubinger (2010) maiores valores de porosidade do leite, indicam uma maior possibilidade de degradação de componentes susceptíveis à oxidação, devido à maior quantidade de oxigênio em contato com as partículas.

Os valores obtidos para a massa específica aparente se encontram na faixa definida por BARBOSA-CÁNOVAS et al. (2005) de 300 – 800 kg.m⁻³ para alimentos em pó, mas apresentam valores inferiores para a massa específica real de 1400 kg.m⁻³.

Apesar do teste de Tukey indicar, de modo geral, diferença significativa entre os pós produzidos a partir de cada condição no CTD, pode-se considerar que os valores de massa específica aparente e de porosidade que diferem são, principalmente, entre o pó liofilizado com os demais obtidos pela secagem em CTD. Isso pode ser justificado pelos métodos de secagem empregados, onde o contato com altas temperaturas no *cast-tape drying* em relação ao liofilizador, que podem colapsar a estrutura, produzindo pós mais compactos. Além do efeito de rugosidade que os processos causam nas características da superfície das partículas como representados na Figura 25 e discutido no tópico 4.5.3. Tonon, Brabet e Hubinger (2010) encontraram valores entre 0,370 – 0,480 g.cm⁻³; 1,491 – 1,531 g.cm⁻³ e 68,33 – 75,49 %, para as massas específicas aparente e real, e a porosidade do leite, respectivamente, para pós de açaí com diferentes agentes carreadores em *spray-drying*.

A diferença entre os resultados obtidos pelo presente trabalho e os apresentados por Tonon, Brabet e Hubinger (2010) para pós de açaí, pode ser explicada pelos diferentes processos empregados e pela adição de agentes carreadores utilizados no *spray-drier*, os quais induzem o aprisionamento de ar dentro das partículas, causando um aumento da porosidade e redução da massa específica aparente (GOULA E ADAMOPOULOS, 2008).

4.5.5 Solubilidade aparente e tempo de dispersão

A solubilidade aparente e o tempo de dispersão dos pós de açaí produzidos pelas diferentes condições de secagem estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Solubilidade aparente e tempo de dispersão dos pós em água para os pós de açaí produzidos pelas condições de secagem no CTD a 65, 80 e 90 °C, com *gaps* de espalhamento de 2 e 3 mm, e do pó liofilizado

Processo	Solubilidade Aparente (%)		Tempo de dispersão (s)	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
65 °C	34,40±1,03 ^{a,A}	32,71±1,04 ^{a,A}	32,99±2,67 ^{a,B}	110,49±1,04 ^{a,A}
80 °C	34,20±1,83 ^{a,A}	33,33±2,09 ^{a,A}	25,17±2,41 ^{b,A}	25,61±1,55 ^{b,A}
90 °C	33,91±0,87 ^{a,A}	30,57±0,37 ^{a,B}	14,69±0,14 ^{c,B}	19,60±0,87 ^{c,A}
Liofilização	31,66±0,53		22,90±1,69	

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

A solubilidade dos pós de açaí observadas foi em torno de 32 % para todas as condições. Esse fato pode ser justificado pelo elevado conteúdo de fibras insolúveis – 7 g.100 g⁻¹ - existente na matéria-prima, assim como a presença de óleo. Segundo Nijdam e Langrish (2006) a presença do óleo na superfície das partículas reduz a solubilidade do pó em água.

Considera-se que pós produzidos a partir de *spray-drying* podem apresentar valores maiores de solubilidade para um mesmo produto se comparado com os processos de *cast-tape drying* e liofilização. Esse fato se justifica pela adição de maltodextrina para a produção de pó em *spray-drying* e pelo processo quebrar as fibras em pequenas partículas em função da elevada atomização do material (CAPARINO et al., 2012).

O tempo de dispersão está relacionado ao tempo para que o pó penetre no líquido, sendo necessário considerar fatores como porosidade, tamanho, geometria e composição da superfície das partículas (HOGEKAMP; SCHUBERT, 2003; FORNY; MARABI; PALZER, 2011).

Segundo Hoge Kamp e Schubert (2003) o tempo de dispersão é acelerado quanto maior o diâmetro e a porosidade das partículas, devido a maior facilidade de penetração da água em função da maior quantidade de espaços vazios. Porém, os dados obtidos para esse parâmetro – Tabela 20 - não apresentaram uma relação com o tamanho nem com a massa específica aparente das partículas, indicados nas Tabelas 17 e 18, respectivamente.

Os valores para o tempo de dispersão foram menores com o aumento da temperatura no CTD. Como descrito por Nijdam e

Langrish (2006) em estudo da determinação da composição da superfície de leite em pó por espectroscopia eletrônica, as moléculas de óleo encontram-se mais na superfície dos pós para as condições onde temperaturas maiores foram utilizadas na secagem. Esse fato garante que, ao entrar em contato com a água, as moléculas se dispersem mais facilmente permitindo uma maior interação entre a superfície do pó e o solvente; enquanto que para as condições a 65 °C no CTD, o óleo envolto na partícula dificulta a ligação com a água e, conseqüentemente, aumenta o tempo de dispersão.

O pó obtido na condição de secagem a 65 °C e 3 mm em CTD apresentou um tempo de dispersão superior em 470 % em relação a média dos demais, possivelmente em função do menor tamanho de partícula juntamente com a influência do óleo descrito anteriormente para temperatura mais baixa.

4.5.6 Cor

Os parâmetros associados à medida da cor dos pós produzidos em cada condição apresentada nesse estudo encontram-se nas Tabela 21 e 22.

Tabela 21- Parâmetros L*, a* e b* da escala de cor CIELAB para os pós produzidos a partir das temperaturas 65, 80 e 90 °C nos gaps de espalhamento de 2 e 3 mm e do pó liofilizado

Processo	L*		a*		b*	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
65 °C	31,16±0,05 ^{b,A}	27,01±0,88 ^{a,B}	1,11±0,01 ^{b,B}	1,76±0,06 ^{c,A}	-0,14±0,01 ^{c,B}	0,60±0,12 ^{a,A}
80 °C	4,59±0,04 ^{c,B}	17,74±0,03 ^{b,A}	3,48±0,06 ^{a,A}	2,02±0,03 ^{b,B}	0,48±0,13 ^{a,A}	0,02±0,03 ^{b,B}
90 °C	32,73±0,02 ^{a,A}	15,04±1,18 ^{c,B}	1,08±0,01 ^{b,B}	2,36±0,13 ^{a,A}	0,18±0,02 ^{b,B}	0,60±0,25 ^{a,A}
Liofilizado	18,28±0,01		2,97±0,06		-0,39±0,05	

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

Tabela 22 - Ângulo Hue e chorma para os pós produzidos a partir das temperaturas 65, 80 e 90 °C - nas espessuras de 2 e 3 mm - e do pó liofilizado

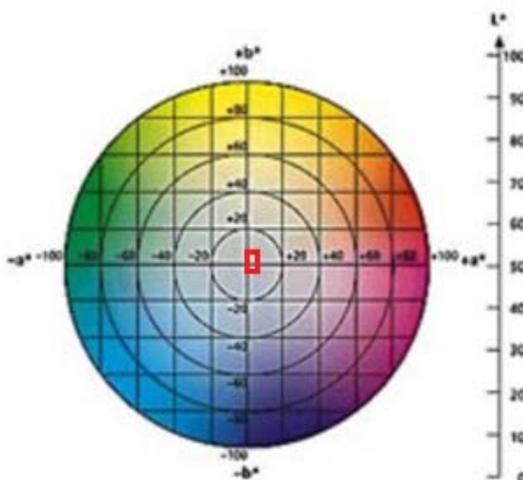
Processo	Ângulo Hue (°)		Chroma	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
65 °C	7,18	18,82	1,12	1,86
80 °C	7,85	0,57	3,51	2,02
90 °C	9,46	14,26	1,09	2,44
Liofilizado	-7,48		3,00	

Os pós apresentaram valores baixos de L^* , indicando que as amostras possuem uma cor mais associada ao tom escuro (preto). Isso é justificado pela cor própria da polpa de açaí, que é ainda mais evidenciada ao ser submetida ao processo de secagem.

As amostras também apresentaram valores positivos de a^* e negativos ou baixos de b^* , devido à presença de antocianinas que fornecem a coloração entre laranja, vermelho, violeta e azul (WROLSTAD, 2004).

Como forma de tornar essa análise mais direta, optou-se por calcular o ângulo Hue que mede a propriedade da cor e o parâmetro Chroma que indica a intensidade de saturação da cor apresentada. Sendo assim, os valores calculados para cada amostra podem ser comparados com a escala representada na Figura 27.

Figura 27 - Representação gráfica dos parâmetros L^* , a^* e b^* da escala CIELAB, ângulo Hue e Chroma. A delimitação pelo retângulo vermelho engloba a região em que se encontram os valores dos parâmetros a^* e b^* dos pós produzidos a partir de todas as condições experimentais estudadas (CTD: 65, 80 e 90 °C – 2 e 3 mm; FD).



Fonte: COLMAT, 2015.

Ao se comparar os valores do ângulo Hue e do Chroma apresentados na Tabela 22 com a Figura 27, verifica-se que cor das

amostras é predominante roxa, mas com reduzida vivacidade. De forma geral, observa-se que os pós são escuros, opacos e apresentam tonalidade arroxeada.

Não se verificou influência da temperatura ou da espessura na cor das amostras produzidas por CTD. Pavan (2010) encontrou valores de 19,05; 6,44; 0,59; 0,092 e 6,47 para os parâmetros L*, a*, b*, ângulo Hue e Chroma, respectivamente, para pós de açaí submetidos à secagem em RW com água aquecida a 94 °C, sendo que esses valores foram superiores aos medidos para o açaí liofilizado no mesmo estudo.

4.5.7 Compostos Fenólicos e Antocianinas Totais

Na Tabela 23 estão apresentados os valores para os compostos fenólicos totais encontrados para a polpa *in natura* e para os pós obtidos pela secagem no CTD e no liofilizador.

Tabela 23 - Concentração de compostos fenólicos totais expresso em mg de equivalente do ácido gálico por 100 g de extrato seco para os pós produzidos em CTD nas temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C e nos *gaps* de espalhamento de 2 e 3 mm; para o pó liofilizado e para a polpa *in natura*.

Processo	Equivalente de ácido gálico (mg por 100 g de extrato seco)	
	2 mm	3 mm
CTD		
65 °C	1216,8 ± 45,83 ^{c,B}	1335,8 ± 14,7 ^{b,A}
80 °C	1446,9 ± 39,7 ^{a,A}	1527,6 ± 172,2 ^{a,A}
90 °C	1383,6 ± 54,9 ^{b,A}	1410,2 ± 114,1 ^{a,b,A}
Liofilização	1729,7 ± 48,1	
Polpa <i>in natura</i>	1661,9 ± 22,0	

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

Na Tabela 24 estão apresentados os valores encontrados para as antocianinas totais determinadas a partir da quantificação da cianidina-3-glicosídeo nos pós em cada condição estudada no presente trabalho, assim como na matéria-prima.

Tabela 24 - Antocianinas totais expressas em mg de cianidina-3-glicosídeo por 100 g de extrato seco para os pós obtidos nas temperaturas de aquecimento 65, 80 e 90 °C – *gaps* de espalhamento de 2 e 3 mm, para o pó liofilizado e para a polpa *in natura*.

Processo	Cianidina-3-glicosídeo (mg por 100 g de extrato seco)	
	2 mm	3 mm
CTD		
65 °C	268,4 ± 10,8 ^{c,B}	299,6 ± 18,7 ^{b,B}
80 °C	375,2 ± 10,3 ^{a,A}	379,6 ± 4,2 ^{a,A}
90 °C	348,5 ± 9,2 ^{b,B}	379,1 ± 11,1 ^{a,A}
Liofilização	766,2 ± 25,1	
Polpa <i>in natura</i>	706,9 ± 33,3	

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

A polpa *in natura* apresentou um valor inferior de compostos fenólicos e de antocianinas totais em relação ao pó liofilizado, apesar da massa de matéria-prima utilizada na extração ser equivalente a dos pós (cálculo por balanço de massa). Isso pode ser justificado pelo fato das partículas de pó apresentarem uma maior área superficial, facilitando a extração, o que reflete na sua quantificação.

As duas análises indicaram uma maior retenção nutricional ao se utilizar a temperatura de aquecimento de 80 °C em ambas as espessuras, sendo que o espalhamento a 3 mm em todas as condições de secagem em CTD apresentaram menor degradação, resultado da menor área superficial em contato com o ar em relação ao volume total de amostra, de forma a reduzir a oxidação da polpa pelo contato com o oxigênio.

Segundo Hellström, Mattila e Karjalainen (2013) a estabilidade das antocianinas é afetada por diversos fatores como o tipo de antocianinas, o produto avaliado e especialmente a temperatura. Isso pode ser comprovado pelo fato de não existir diferença significativa – com um nível de confiança de 90 % - entre as condições de 80 e 90 °C na espessura de 3 mm e apresentar uma diferença menor que 5 % no espalhamento de 2 mm. Uma justificativa possível foi em função das temperaturas da polpa atingirem valores similares - 70 e 72 °C, respectivamente - durante a secagem no CTD. Essa constatação permite afirmar que tanto os compostos fenólicos como as antocianinas são influenciadas de forma mais intensa pela temperatura aplicada na polpa

do que pelo tempo de exposição ao calor, uma vez que os tempos de secagem entre 65 e 80 °C são próximos – vide Tabela 8 – e apresentaram diferença significativa na quantificação desses polifênóis. Isso também pode ser comprovado em função das espessuras não apresentarem efeito sobre os valores apresentados nas Tabelas 23 e 24, apesar do acréscimo no tempo de secagem para as espessuras de 3 mm.

O pó liofilizado permaneceu com uma maior concentração de compostos fenólicos e de antocianinas totais em função do processo não expor a matéria-prima ao aquecimento.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária estudou a degradação das antocianinas do açaí frente a diferentes temperaturas de armazenamento. Foram encontrados tempos de meia vida de 343,8; 42,9 e 23,9 horas para as temperaturas de 0; 25 e 40 °C, respectivamente (EMBRAPA, 2007). Pacheco-Palencia, Hawken e Talcott (2007b) reportaram valores de meia-vida de 2,0-2,7 e 2,1-2,9 dias para a cianidina-3-glicosídeo e a cianidina-3-rutinosídeo, respectivamente, para suco de açaí clarificado armazenado a 37 °C.

Assim como descrito por Silva e Rogez (2013) os valores encontrados para os compostos fenólicos - expressos em equivalentes de ácido gálico - são superiores aos reportados para as antocianinas - expressas em cianidina-3-glicosídeo. Silva e Rogez (2013) relataram uma concentração de 397,7 mg.g⁻¹ extrato seco e 20,7 mg.g⁻¹ extrato seco para o ácido gálico e a cianidina-3-glicosídeo, para o extrato vegetal de *Euterpe oleracea*, respectivamente. Del Pozo-Insfran, Brenes e Talcott (2004) encontraram valores de 64,5 mg de ácido gálico.L⁻¹ de polpa de açaí e mais cinco derivados desse ácido que somam 100,2 mg de ácido gálico.L⁻¹ de polpa. Pacheco-Palencia; Hawken e Talcott (2007b) detectaram a presença de dois derivados de ácido gálico no suco de açaí clarificado de 30,1 e 32,9 mg de ácido gálico equivalente.L⁻¹ de suco, sendo esses valores reduzidos a 50 % após 12 dias armazenados a 37 °C.

Tonon, Brabet e Hubinger (2010) encontraram um conteúdo de antocianinas para polpa de açaí filtrada após secagem em *spray-drying* de 3946,14 mg de cianidina-3-rutinosídeo.100 g⁻¹ de matéria seca; e valores entre 3247,15 e 3436,85 mg de cianidina-3-rutinosídeo.100 g⁻¹ de matéria seca ao utilizar diferentes agentes carreadores para esse tipo de secagem. A diferença entre os dados reportados por Tonon, Brabet e Hubinger (2010) e os apresentados na Tabela 24 podem ser justificados pelo composto quantificado. Segundo Lichtenthäler et al. (2005); Rosso et al. (2008) e Tonon, Brabet e Hubinger (2010) o componente

cianidina-3-rutinosídeo é majoritário no açaí, sendo reportado dados de 88 % de predominância por Rosso et al. (2008).

Del Pozo-Insfran, Brenes e Talcott (2004) encontraram 1040 mg de cianidina-3-glicosídeo.L⁻¹ de polpa fresca de açaí, valor equivalente a 78,3 % do valor reportado no presente estudo de 1328,8 mg de cianidina-3-glicosídeo.L⁻¹ de polpa de açaí; enquanto que Pacheco-Palencia, Ducan e Talcott (2009) reportaram valores de 67,6 % do valor encontrado para a polpa. Pacheco-Palencia, Hawken e Talcott (2007b) relataram a presença de 42,4 mg de cianidina-3-glicosídeo.L⁻¹ de suco de açaí clarificado.

4.5.8 Atividade Antioxidante

A Tabela 25 demonstra a atividade antioxidante em relação à massa equivalente de Trolox da matéria-prima, assim como a dos pós obtidos pelas diferentes condições de secagem do presente estudo determinada pelos métodos ABTS e DPPH.

Tabela 25 - Atividade antioxidante determinada pelos métodos ABTS e DPPH da polpa de açaí e dos pós de açaí obtidos pela secagem em CTD utilizando as temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C - com espalhamento de 2 e 3 mm e no pó liofilizado. Valores expressos em µmol de Trolox equivalente por g de extrato seco.

Processo	ABTS (µmol TE por g de extrato seco)		DPPH (µmol TE por g de extrato seco)	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
65 °C	1134,8±30,1 ^{b,A}	1050,1±40,9 ^{b,B}	1671,3±232,1 ^{b,A}	989,5±123,1 ^{b,B}
80 °C	1218,2±64,0 ^{a,A}	1213,4±40,1 ^{a,A}	1654,1±0,0 ^{b,A}	938,3±350,3 ^{b,B}
90 °C	1118,5±35,7 ^{a,b,B}	1255,2±52,2 ^{a,A}	2926,9±351,1 ^{a,A}	1708,4±113,1 ^{a,B}
Liofilização	1615,4±59,1		4216,7±710,4	
Polpa <i>in natura</i>	1635,7±5		3962,0±370,5	

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

A diferença entre os resultados apresentados na Tabela 25 – como o aumento da atividade antioxidante pelo método DPPH para as amostras liofilizadas e para a polpa *in natura* em relação ao apresentado pelo ABTS - para os dois métodos, pode ser justificada pelas cinéticas de reação e condições do sistema variarem, apesar do mecanismo de ambos ser o mesmo (SCHAICH; TIAN; XIE, 2015).

A polpa congelada e o produto liofilizado não foram submetidos ao aquecimento e por isso apresentaram a maior atividade antioxidante.

Os valores obtidos pelo método ABTS seguiram uma tendência similar ao da concentração de antocianinas – vide Tabela 24 – ao não apresentarem diferença significativa entre os valores a 80 e a 90 °C e apresentarem para a temperatura de 65 °C. De acordo com os dados obtidos pelo método DPPH, tanto a temperatura como a espessura utilizadas na secagem em CTD interferiram na atividade antioxidante, onde o tempo de secagem – vide Tabela 8 - foi o fator principal na redução da atividade biológica, ao não apresentar diferença significativa para as temperaturas de aquecimento de 65 e 80 °C e apresentar para a temperatura da água de 90 °C. Além disso, valores superiores em 68,8; 76,0 e 71,5 % para as condições de 65, 80 e 90 °C, respectivamente, que utilizaram a espessura de 2 mm.

Tonon, Brabet e Hubinger (2010) relataram valores de 1230,43 $\mu\text{mol TE.g}^{-1}$ de matéria seca de açaí e 1101,73-1165,84 $\mu\text{mol TE.g}^{-1}$ de matéria seca para o mesmo produto seco em *spray-drying* adicionados com diferentes agentes carreados, ao utilizar o método DPPH. Pacheco-Palencia, Hawken e Talcott (2007b) encontraram o valor de 61,5 $\mu\text{mol TE.mL}^{-1}$ de suco de açaí clarificado. Pacheco-Palencia, Duncan e Talcott (2009) relataram uma capacidade antioxidante de 87,4 $\mu\text{mol TE.g}^{-1}$ para açaí, sendo que 82,4 $\mu\text{mol TE.g}^{-1}$ foram em função das antocianinas.

4.6 CARACTERIZAÇÃO DOS PÓS REIDRATADOS

4.6.1 Umidade, atividade de água, sólidos solúveis e pH

As Tabelas 26 e 27 apresentam os valores de umidade, a_w , sólidos solúveis e pH para a polpa obtida pela reidratação dos pós até a umidade e até a concentração de sólidos solúveis iniciais, respectivamente.

Tabela 26 – Parâmetros obtidos ao se reidratar os pós produzidos a partir da secagem em CTD nas temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C – nos *gaps* de espalhamento de 2 e 3 mm; e para o pó liofilizado até próximo da umidade da polpa *in natura* (80,97 ± 0,11 %).

Processo	Umidade (%)		°Brix		a _w		pH	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
CTD								
65 °C	78,5±0,2 ^{a,A}	77,5±0,4 ^{b,B}	5,3±0,2 ^{c,B}	6,6±0,4 ^{b,A}	1,000±0,001 ^{a,A}	0,997±0,001 ^{a,B}	4,95±0,02 ^{a,B}	5,00±0,08 ^{a,A}
80 °C	78,2±0,8 ^{a,A}	78,4±0,2 ^{a,A}	5,9±0,2 ^{b,B}	7,5±0,2 ^{a,A}	0,999±0,002 ^{a,A}	0,997±0,001 ^{a,A}	4,90±0,01 ^{a,A}	4,77±0,17 ^{b,A}
90 °C	78,0±0,2 ^{a,A}	78,1±,3 ^{a,b,A}	6,3±0,2 ^{a,A}	5,6±0,1 ^{c,B}	0,999±0,002 ^{a,A}	0,998±0,001 ^{a,A}	4,99±0,10 ^{a,A}	4,86±0,14 ^{a,B}
Liofilização	78,6±0,1		7,3±0,2		0,998±0,002		4,93±0,01	

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

Tabela 27 - Parâmetros obtidos ao se reidratar os pós produzidos a partir da secagem em CTD nas temperaturas de aquecimento de 65, 80 e 90 °C – nos *gaps* de espalhamento de 2 e 3 mm e para o pó liofilizado até uma concentração de sólidos solúveis próxima a da polpa *in natura* (10,0 ± 1,2 °Brix).

Processo	Umidade (%)		°Brix		a _w		pH	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
CTD								
65 °C	71,7±0,2 ^{a,A}	71,0±0,1 ^{a,B}	8,7±0,2 ^{a,B}	9,0±0,1 ^{a,A}	0,994±0,002 ^a _A	0,994±0,001 ^a _A	4,93±0,04 ^a _A	4,65±0,01 ^b _B
80 °C	71,4±0,1 ^{a,A}	70,8±0,1 ^{b,B}	9,1±0,3 ^a _A	8,7±0,1 ^{b,B}	0,991±0,001 ^a _A	0,992±0,001 ^{a,A}	4,66±0,23 ^a _A	4,90±0,01 ^a _A
90 °C	70,4±0,6 ^{b,A}	70,7±0,1 ^{b,A}	8,7±0,5 ^a _A	8,7±0,2 ^b _A	0,992±0,001 ^a _A	0,992±0,002 ^{a,A}	4,87±0,10 ^a _A	4,66±0,02 ^b _B
Liofilização	72,1±0,2		11,6±0,5		0,994±0,001		4,77±0,17	

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

As umidades apresentadas na Tabela 26 foram inferiores em uma média de 2 % em relação à matéria-prima, assim como também apresentaram uma redução média de 3,7 % na concentração de sólidos solúveis, demonstrando que a alteração da estrutura em função do processamento gera uma mudança na reidratação dos pós.

Ao reconstituir as polpas até a concentração de sólidos solúveis próxima a da polpa *in natura* ($10,0 \pm 1,2$ °Brix) – Tabela 27 – obteve-se valores de umidade, em média, de 71,2 %, o que representa um decréscimo de 10 % se comparados à matéria-prima. Assim, é indicado verificar qual é o objetivo no momento da reidratação dos pós de açaí para determinar o volume de água a ser adicionado.

O pó liofilizado apresentou a maior concentração de sólidos solúveis, apesar da maior quantidade de água adicionada em relação aos pós obtidos pelo CTD na Tabela 27, devido à menor alteração estrutural resultante do processo, permitindo a reidratação do produto de uma forma mais completa com menor formação de sedimentos.

Os valores de atividade de água apresentaram diferenças significativas entre os dados apresentados nas Tabelas 26 e 27. Isso é justificado pela quantidade de água adicionada em cada amostra, comprovando o fato de que produtos com menor umidade apresentam um teor de água livre inferior.

Comparando os valores obtidos para o pH nas Tabelas 26 e 27 com o da matéria-prima utilizada ($5,00 \pm 0,003$), notou-se que os valores permaneceram na faixa entre 4,65 – 5,0, como resultado do processo de secagem não alterar a capacidade de dissociação dos ácidos presentes.

Apesar da secagem retirar apenas umidade do produto, a forma em que ocorre a reidratação do pó é diferente ao se considerar o teor de água ou os sólidos solúveis da amostra. Isso pode ser justificado pelo rompimento e reorganização de estruturas alterando a ligação com a água. Foi observado que a condição de reidratação até a umidade inicial gerou a sedimentação de partículas, ao contrário do encontrado para a concentração de sólidos solúveis inicial. Esse fato está de acordo com Hoge Kamp e Schubert (2003), que afirmam que para evitar a formação de sedimentos em uma reidratação é necessário utilizar partículas suficientemente pequenas ou aumentar a viscosidade do líquido, o que pode ocorrer com a redução da adição de água.

4.6.2 Cor

Caracterizou-se as polpas reconstituídas em ambas as condições, conforme seção 4.6.1, em relação a cor. Na Tabela 28 encontram-se os dados para a polpa descongelada utilizada como matéria-prima, seguida pelas Tabelas 29-30 e 31-32 que indicam os valores dos parâmetros de cor para a reidratação até o teor de água e os sólidos solúveis iniciais, respectivamente.

Tabela 28 – Parâmetros de cor da escala CIELAB, ângulo Hue e Chroma para a polpa descongelada utilizada como matéria-prima para produção dos pós.

Condição	L*	a*	b*	Ângulo Hue (°)	Chroma
Polpa descongelada	0,80±0,06	5,50±0,39	1,26±0,06	12,90	5,64

Tabela 29 - Parâmetros de cor da escala CIELAB para as polpas reconstituídas obtidas a partir da adição de água destilada para atingir uma umidade próxima a inicial da polpa de açaí.

Processo	L*		a*		b*	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
CTD						
65 °C	0,04±0,00 ^{c,B}	0,07±0,01 ^{b,A}	0,29±0,02 ^{c,B}	0,53±0,05 ^{b,A}	0,07±0,00 ^{c,B}	0,12±0,01 ^{b,A}
80 °C	0,08±0,01 ^{b,A}	0,05±0,00 ^{c,B}	0,57±0,04 ^{b,A}	0,35±0,03 ^{c,B}	0,13±0,01 ^{b,A}	0,08±0,01 ^{c,B}
90 °C	0,09±0,00 ^{a,A}	0,08±0,00 ^{a,B}	0,68±0,06 ^{a,A}	0,60±0,01 ^{a,B}	0,16±0,02 ^{a,A}	0,14±0,00 ^{a,B}
Liofilização	0,13±0,01		0,97±0,04		0,23±0,01	

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

Tabela 30 - Ângulo Hue e Chroma para as polpas reconstituídas obtidas a partir da adição de água destilada para atingir uma umidade próxima a inicial da polpa de açaí. Diferença de cor (ΔE) entre a polpa reconstituída e a polpa descongelada.

Processo	Ângulo Hue (°)		Chroma		ΔE	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
CTD						
65 °C	13,57	12,76	0,30	0,54	5,40	5,15
80 °C	12,85	12,88	0,58	0,36	5,11	5,34
90 °C	13,24	13,13	0,70	0,62	5,00	5,08
Liofilização	15,00		1,00		4,69	

Tabela 31 - Parâmetros de cor da escala CIELAB para as polpas reconstituídas obtidas a partir da adição de água destilada para atingir uma concentração de sólidos solúveis próxima a inicial da polpa de açaí.

Processo	L*		a*		b*	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
CTD						
65 °C	0,09±0,01 ^{c,A}	0,09±0,01 ^{a,A}	0,70±0,03 ^{c,A}	0,67±0,04 ^{a,A}	0,16±0,01 ^{c,A}	0,16±0,01 ^{a,A}
80 °C	0,55±0,03 ^{a,A}	0,07±0,00 ^{b,B}	3,82±0,19 ^{a,A}	0,51±0,01 ^{b,B}	0,95±0,05 ^{a,A}	0,12±0,00 ^{b,B}
90 °C	0,50±0,02 ^{b,A}	0,09±0,00 ^{a,B}	3,50±0,12 ^{b,A}	0,69±0,01 ^{a,B}	0,87±0,03 ^{b,A}	0,16±0,00 ^{a,B}
Liofilização	20,78±,07		3,80±0,05		1,70±0,03	

Letras maiúsculas diferentes na linha indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

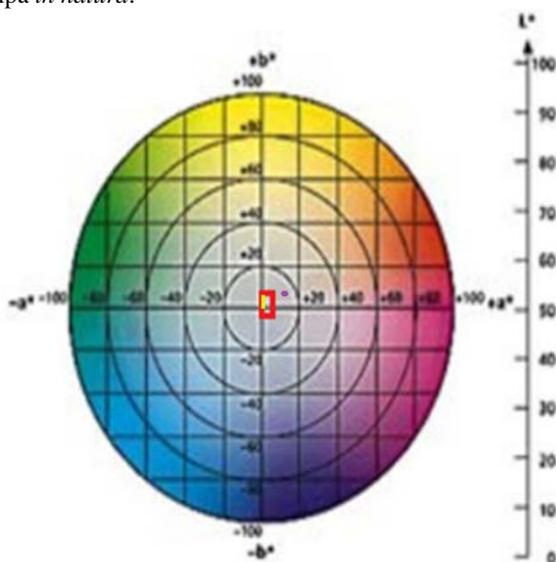
** Letras minúsculas diferentes na coluna indicam que os valores apresentam diferença significativa em um nível de confiança de 90 % pelo teste de Tukey.

Tabela 32 - Ângulo Hue e Chroma para as polpas reconstituídas obtidas a partir da adição de água destilada para atingir uma concentração de sólidos solúveis próxima a inicial da polpa de açaí. Diferença de cor (ΔE) entre a polpa reconstituída e a polpa descongelada.

Processo	Ângulo Hue (°)		Chroma		ΔE	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
CTD						
65 °C	12,88	13,43	0,72	0,72	4,98	5,00
80 °C	13,96	13,24	3,94	0,52	1,73	5,17
90 °C	14,00	13,06	3,61	0,71	2,06	4,98
Liofilização	24,10		4,16		20,06	

Os valores dos parâmetros da escala CIELAB para os pós, as polpas reconstituídas e a polpa *in natura* estão apresentados na Figura 28 para fins de comparação e de forma que a análise seja mais visual.

Figura 28 - Representação gráfica dos parâmetros L^* , a^* e b^* da escala CIELAB, ângulo Hue e Chroma. A delimitação pelo retângulo vermelho engloba a região em que se encontram os valores dos parâmetros a^* e b^* dos pós produzidos a partir de todas as condições experimentais estudadas (CTD: 65, 80 e 90 °C – 2 e 3 mm; FD); a linha amarela representa a região dos parâmetros de cor das polpas reconstituídas (em relação à umidade e à concentração de sólidos iniciais) e o círculo roxo representa os parâmetros L^* , a^* e b^* da polpa *in natura*.



Fonte: COLMAT, 2015.

O conteúdo de água adicionada interferiu na coloração das amostras, onde as reconstituídas até o teor de sólidos inicial – com exceção da reconstituída a partir do pó liofilizado - apresentaram uma diferença menor em relação à polpa de açaí, em função da água se mostrar mais incorporada à sua estrutura. Segundo Coutinho et al. (2015) a menor hidratação, devido à redução da quantidade de água adicionada, contribui para a estabilidade da cor.

As amostras reconstituídas apresentaram, em relação à polpa, coloração mais escura (L^* próximo à zero), com menor tonalidade avermelhada (a^* menor) e menos azulada (b^* menor). Essas características são justificadas pelo processamento em CTD permitir a oxidação de parte das antocianinas – que são responsáveis pela coloração do produto - pelo contato com o oxigênio e com o calor, enquanto que os parâmetros L^* , a^* e b^* da amostra reconstituída a partir do pó liofilizado se apresentam mais próximos ao da matéria-prima. Segundo Del Pozo-Insfran, Brenes e Talcott (2004) as antocianinas são instáveis durante o processamento em função da cinética química, o que explica esse escurecimento.

Em relação ao ângulo Hue a intensidade da cor das polpas reconstituídas foi similar à da matéria-prima com ênfase na coloração roxa. Além disso, as amostras reconstituídas até a umidade inicial se apresentaram mais opacas – com menor saturação da cor – em relação às reconstituídas até o teor de sólidos inicial.

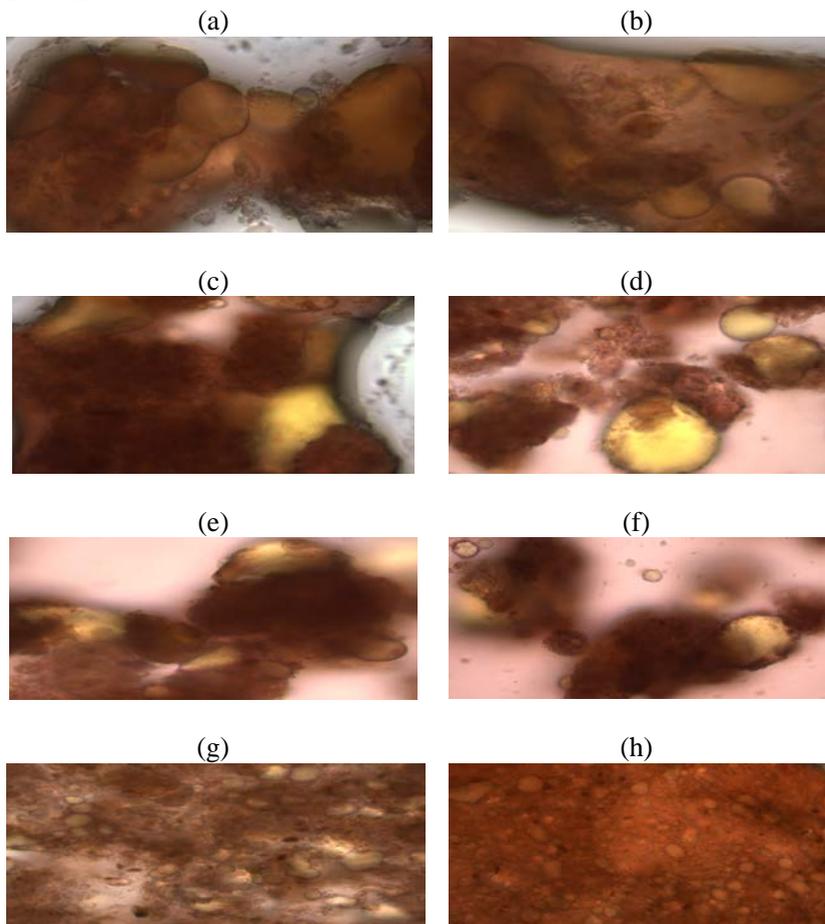
Diferentemente do reportado por Kus et al. (2014) não houve uma correlação negativa entre L^* o conteúdo de compostos fenólicos e a atividade antioxidante das amostras, assim como apenas a polpa reconstituída a partir do pó liofilizado apresentou uma correlação positiva entre os parâmetros a^* e b^* e o conteúdo de compostos fenólicos e atividade antioxidante em comparação com as polpas reconstituídas a partir dos pós obtidos pela secagem em CTD.

Pavan (2010) reportou valores de 12,42; 16,61; 4,94; 0,29 e 17,33 para os parâmetros L^* , a^* , b^* , ângulo Hue e Chroma, respectivamente, para suco de açaí acidificado e pasteurizado com 2-5 °Brix.

4.6.3 Microscopia Óptica (MO)

Na Figura 29 estão apresentadas as imagens registradas com o auxílio de um microscópio óptico da polpa de açaí, assim como da polpa reconstituída a partir do pó obtido em cada condição de secagem avaliada no presente trabalho.

Figura 29 - Imagens obtidas por microscópio óptico das polpas reconstituídas a partir da adição de água destilada na proporção de 1:5 nos pós para as condições de secagem de 65 °C – 2 (a) e 3 (b) mm; 80 °C – 2 (c) e 3 (d) mm; 90 °C – 2 (e) e 3 (f) mm; para o pó liofilizado (g) e da polpa de açaí *in natura* (h). Aumento de 100 vezes.



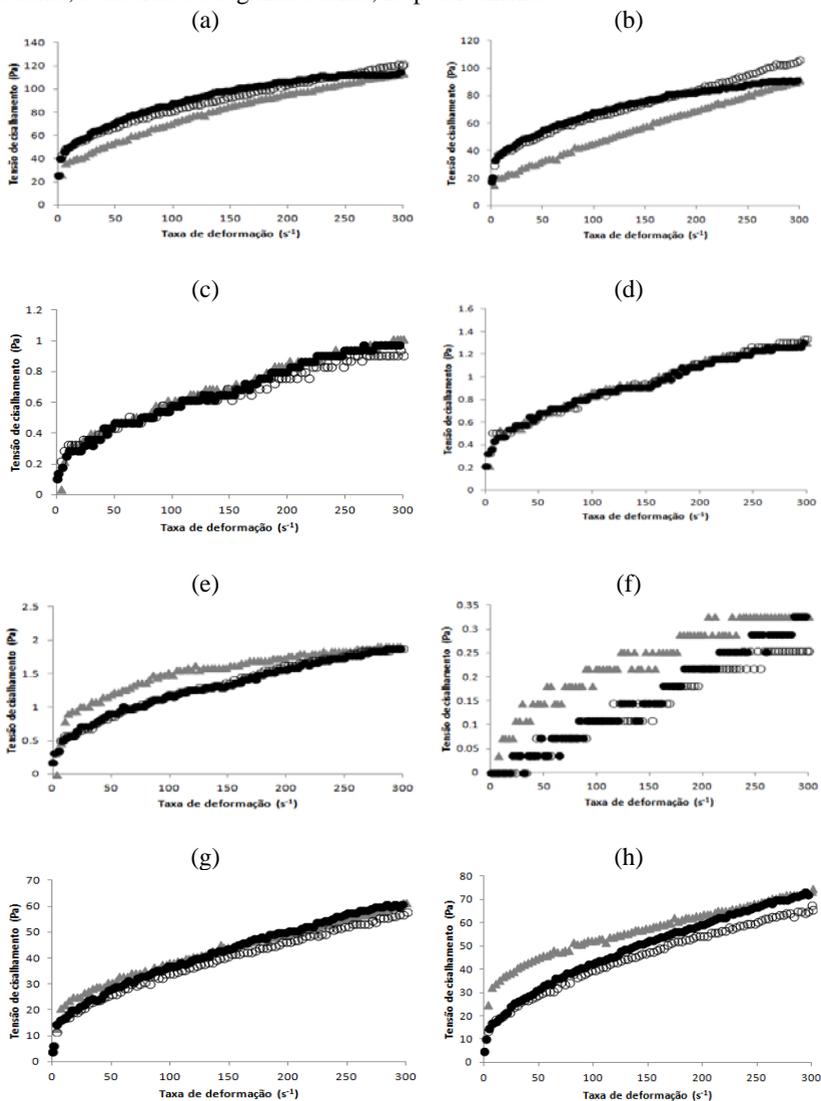
A presença e distribuição do óleo nas polpas podem ser observadas em todas as imagens (Figura 29). A polpa reconstituída a partir do pó liofilizado apresentou uma característica mais similar ao da matéria-prima, com partículas menores e mais bem distribuídas de óleo, em função de o processo alterar minimamente a estrutura do produto e, consequentemente, proporcionar uma reconstituição mais efetiva.

Em relação às polpas reconstituídas a partir dos pós produzidos em CTD, observou o mesmo comportamento indicado pela Figura 26, em que as amostras reconstituídas a partir do processo a 65 °C apresentaram as moléculas de óleo mais ligadas às partículas, enquanto que as obtidas pelas condições a 80 e 90 °C apresentaram o óleo com maior interação com o meio líquido. Essa maior desagregação das moléculas de óleo gera uma maior instabilidade no sistema, facilitando a emersão do óleo no meio, fato indesejável pela maior probabilidade de rancificação do produto e por possíveis alterações sensoriais associadas.

4.6.4 Comportamento Reológico

Na Figura 30 estão apresentadas as curvas representativas das triplicatas dos ensaios de taxa de deformação *vs* tensão de cisalhamento aplicados à polpa de açaí *in natura* e às polpas reconstituídas até o teor de sólidos solúveis inicial a fim de verificar a existência do comportamento tixotrópico.

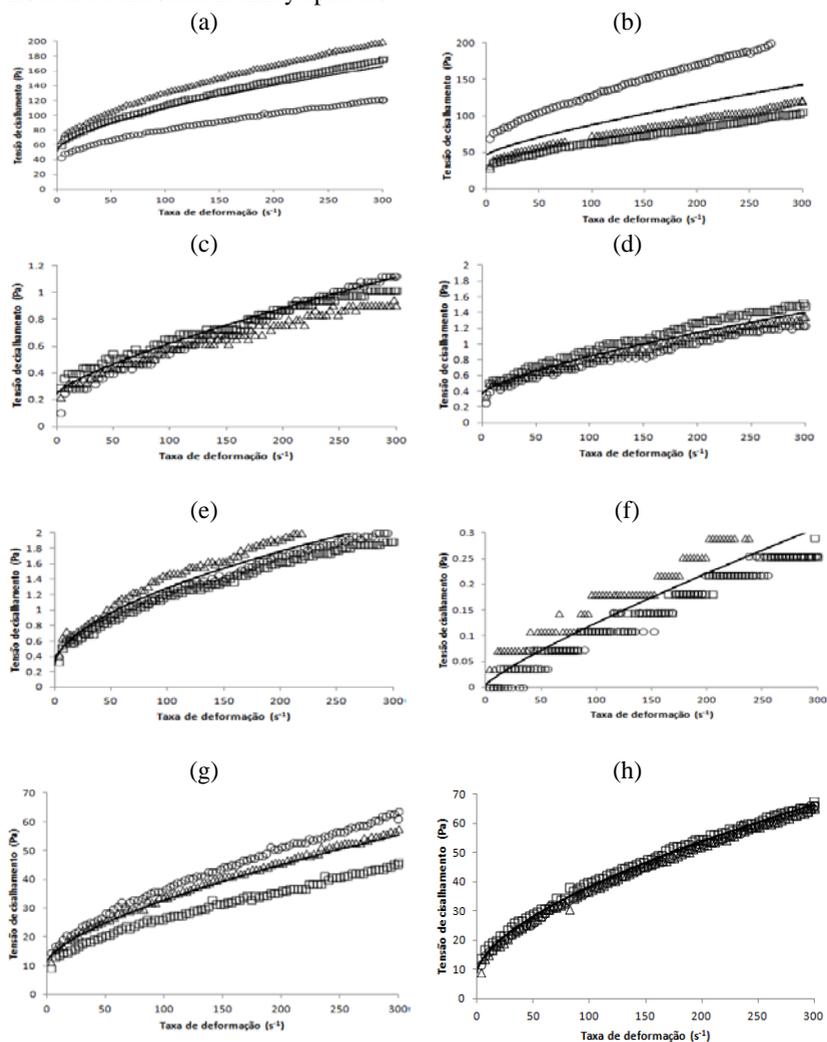
Figura 30 - Curvas representativas da tensão de cisalhamento vs taxa de deformação para as polpas de açaí reconstituídas até a concentração de sólidos solúveis inicial, a partir dos pós obtidos a 65 °C, 2 (a) e 3 (b) mm; 80 °C, 2 (c) e 3 (d) mm; 90 °C, 2 (e) e 3 (f) mm; em CTD; a partir da polpa reconstituída do pó liofilizado (g) e da matéria-prima (h). Ícones Δ , \bullet e \circ representam a primeira subida, a descida e a segunda subida, respectivamente.



Assim como reportado por Tonon et al. (2009) as polpas de açaí - original e reconstituídas - apresentaram um comportamento tixotrópico, com redução da viscosidade aparente com a tensão de cisalhamento (Anexo E). No entanto, observou-se pela Figura 30 que a tixotropia pode ser parcialmente eliminada após três ciclos de cisalhamento – duas subidas e uma descida - por ser um fenômeno reversível (BOURNE, 2002). As condições que apresentaram maiores tensões de cisalhamento – (a), (b), (g) e (h) – a tixotropia foi mais notável em função da limitação de medida do equipamento em tensões reduzidas.

Na Figura 31 estão apresentadas as triplicatas das curvas de escoamento (tensão de cisalhamento *vs.* taxa de deformação) correspondentes à segunda subida (em função da eliminação da tixotropia), assim como o modelo de Herschel-Bulkley ajustado aos dados experimentais, para a polpa de açaí e para as polpas reconstituídas a partir dos pós obtidos nas condições de secagem indicadas no presente estudo.

Figura 31- Triplicatas das curvas de escoamento da polpa reconstituída a partir da secagem em TCD a 65 °C, 2 (a) e 3 (b) mm; 80 °C, 2 (c) e 3 (d) mm e 90 °C, 2 (e) e 3 (f) mm; reconstituída a partir do pó liofilizado (g) e da polpa de açaí *in natura* (h). Símbolos indicam os dados experimentais e a linha contínua o modelo de Herschel-Bulkley aplicado.



A polpa de açaí – original e reconstituída – possui um comportamento pseudoplástico com tensão crítica (Figura 31), por

apresentar um aumento da tensão de cisalhamento mais do que proporcional com o aumento da taxa de deformação (BOURNE, 2002). Na Figura 31 (f) observou-se um comportamento descontínuo, devido o limite de detecção do viscosímetro utilizado ser de 0,1 Pa.s.

Por se tratar de um fluido não Newtoniano, o modelo de Herschel-Bulkley foi ajustado aos dados experimentais e a faixa dos parâmetros obtidos para as curvas de escoamento em cada condição estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 33- Faixa de valores dos parâmetros obtidos do modelo de Herschel-Bulkley ajustado para as triplicatas das curvas de escoamento para a polpa de açaí e para as polpas de açaí reconstituídas a partir dos pós obtidos nas secagem em CTD a 65, 80 e 90 °C - 2 e 3 mm - e liofilizado.

Processo	σ_0 (Pa)		K (Pa.s ⁿ)		n		$R_{ajustado}$	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
CTD								
65 °C	56,27-59,75	32-70,2	2,95-4,42	0,98-1,52	0,61-0,65	0,75-0,79	0,999-0,999	0,996-0,998
80 °C	0,21-0,30	0,32-0,39	0,00-0,02	0,01-0,02	0,68-0,90	0,68-0,74	0,985-0,992	0,990-0,994
90 °C	0,24-0,32	(-0,02)-0,04	0,06-0,10	0,00	0,54-0,59	0,79-0,90	0,995-0,996	0,965-0,970
Liofilização	9,89-12,5		0,77-1,23		0,63-0,67		0,995-0,998	
Polpa	7,23-10,12		1,45-1,94		0,59-0,64		0,998-0,999	

A temperatura de secagem no CTD influenciou a reologia das polpas reconstituídas, diferentemente da espessura utilizada. Os valores de tensão inicial são similares e inferiores a 0,4 Pa para as condições a 80 e 90 °C, possivelmente em função das temperaturas da polpa se manterem a 70 e 72 °C, respectivamente, como discutido no tópico 4.3. Além disso, como descrito nos tópicos 4.5.3 e 4.6.3, o fato das moléculas de óleo se apresentarem mais dispersas gera um efeito profundo na reologia (BOURNE, 2002).

A polpa reconstituída a partir do pó liofilizado apresentou a maior semelhança na reologia em relação à matéria-prima entre as condições estudadas em função deste tipo de processo afetar de forma mínima a estrutura do produto. Sendo assim, analisa-se que em termos de viscosidade, menores temperaturas de secagem viabilizam o desenvolvimento de produtos comercialmente mais interessantes, ao considerar a polpa de açaí.

Guimarães e Mascigrande (2011) também reportaram um comportamento de fluido pseudoplástico para polpa de açaí; assim como Tonon et al. (2009). No entanto, Carneiro et al. (2012) relataram um comportamento Newtoniano para polpas de açaí reconstituídas a partir de pós – provenientes da secagem por atomização - adicionados de água destilada até atingir a solubilidade inicial; avaliadas nas temperaturas de 8, 15, 25, 35 e 45 °C.

5. CONCLUSÃO

A temperatura da água de aquecimento e a espessura do filme influenciam a velocidade de secagem por espalhamento da polpa de açaí sobre o filme de *Mylar* em CTD. Consequentemente, o valor da capacidade evaporativa média foi influenciado pelos parâmetros de operação, variando entre, aproximadamente, 1,2 e 7,0 kg.m⁻².h⁻¹ nas duas condições mais extremas (65 °C/3 mm e 90 °C/2 mm).

Este método de secagem por espalhamento sobre o filme *Mylar* (*cast-tape drying* - CTD) pode ser utilizado como uma alternativa para a produção de pó de açaí em virtude de o processo garantir um produto com estabilidade microbiológica e manutenção da coloração arroxeada e da atividade antioxidante.

Ao se considerar as condições de processo investigadas a mais adequada para a produção industrial de açaí em pó é a que utiliza a temperatura da água de 90 °C e espessura da polpa de 2 mm. Isso se deve ao fato de apresentar a maior taxa, a maior capacidade evaporativa média e, conseqüentemente, menor tempo de secagem do produto; o que gera as menores alterações químicas – em função dos compostos fenólicos e antocianinas totais serem mais susceptíveis ao tempo de processo do que às altas temperaturas de secagem.

A estrutura do produto, no entanto, sofre maior degradação com a temperatura utilizada em relação ao tempo de secagem, de forma que temperaturas mais brandas proporcionam a obtenção de um produto com maior reidratação e comportamento reológico mais similar ao da polpa *in natura*, sendo mais interessante comercialmente pela maior qualidade sensorial.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho abriu espaço para novas indagações que podem ser solucionadas com novos experimentos em trabalhos futuros. Entre elas podem-se destacar:

- Quantificar a influência do oxigênio na degradação dos compostos fenólicos e das antocianinas totais por meio de secagem condutiva sob vácuo.
- Realizar a secagem sob atmosfera modificada a fim de reduzir a oxidação da amostra para produzir açaí em pó com coloração mais similar à da polpa.
- Utilizar outras fontes de aquecimento no *cast-tape drying* - como vapor - para reduzir custos em uma possível aplicação industrial.
- Utilizar sistema de ventilação juntamente com um sistema de exaustão com o objetivo de aumentar a retirada dos vapores no sistema, o que elevaria a taxa de secagem e, conseqüentemente, a redução do tempo de secagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABONYI, B.I. et al. Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window™ system. **Journal of Food Science**, vol. 67, n.3, p. 1051-1056, 2002.
- ABONYI, Brendan I.; TANG, Juming; EDWARDS, Charles G. Evaluation of Energy Efficiency and Quality Retention for the Refractance Window™ Drying System. **Research Report**, Washington State University, Pullman. WA, 1999.
- ADELMANN, Horst; BINKS, Bernard P.; MEZZENGA, Raffaele. Oil Powders and Gels from Particle-Stabilized Emulsions. **Langmuir**, vol. 28, p. 1694-1697, 2012.
- ALBATI, R. et al. Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer. **Energy and Buildings**, v. 66, p.33-40, 2013.
- A.O.A.C. – Association of Official Analytical Chemists. **Official Methods of Analysis**, 18th ed., Gaithersburg, Maryland, 2005.
- APV. APV Dryer Handbook. Disponível em: http://userpages.umbc.edu/~dfrey1/ench445/apv_dryer.pdf . Acesso em 21/06/2015.
- BARBOSA-CÁNOVAS, Gustavo V. et al.(Edit.) *Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, Nova Iorque, E.U.A., 2005.
- BOURNE, Malcolm. *Food Texture and Viscosity*. Food Science and Technology – International Series. Academic Press, 2th, E.U.A., 2002.
- BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M.E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **LWT – Food Science and Technology**, vol. 28, p. 25-30, 1995.

CAPARINO, O.A. et al. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine ‘Carabao’var.) powder. **Journal of Food Engineering**, vol. 111, p. 135-148, 2012.

CARNEIRO, Alessandra Pinheiro Góes et al. Efeito da temperatura no comportamento reológico de pó de açaí (*Euterpe oleracea*) reconstituído. **UNOPAR Científica Ciências Biológicas e da Saúde**, vol. 14, p. 241-245, 2012.

CASTOLDI, Milene et al. Production of tomato powder by Refractance Window drying. **Drying Technology**. Manuscript ID: LDRT – 2014 – 0064.R1, 2014.

CHUA, K.J. et al. Batch drying of banana pieces – effect of stepwise change in drying air temperature on drying kinetics and product colour. **Food Research International**, vol. 34, p. 721-731, 2001.

CLARKE, P.T. Refractance WindowTM – “Down under”. **Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)**. São Paulo, Brasil, 22-25 de Agosto de 2004, vol.B, p.813-820.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Conjuntura Mensal: Açaí (fruto)**, Brasília, 2014.

COUTINHO, Isabel B. et al. Effect of water content on the acid-base equilibrium of cyaniding-3-glucoside. **Food Chemistry**, vol. 172, p. 476-480, 2015.

CUQ, B.; RONDET, E.; ABECASSIS, J. Food powders engineering, between knowhow and science: Constraints, stakes and opportunities. **Powder Technology**, vol. 208, p. 244-251, 2011.

DACANAL, G.C.; MENEGALLI, F.C. Experimental study and optimization of the agglomeration of acerola powder in a conical fluid bed. **Powder Technology**, vol. 188, n. 3, p. 187-194, 2009.

DACANAL, G.C. **Estudo da granulação de suco de acerola desidratado em leite fluidizado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 101 p., Campinas, 2005.

DEL POZO-INSFRAN, David; BRENES, Carmen H.; TALCOTT, Sthephen T. Phytochemical Composition and Pigment Stability of Açai (*Euterpe oleracea* Mart.) **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, vol. 52, p. 1539-1545, 2004.

DIAS, João Carlos Pinto. Notas sobre o *Trypanosoma cruzi* e suas características bio-ecológicas, como agente de enfermidades transmitidas por alimentos. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, vol. 39, p. 370-375, 2006.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Comunicado Técnico**. Efeito da Temperatura nas Antocianinas do Açai. Vol.86, ISSN 1517-4786. São Carlos, 2007.

FENNEMA, Owen R. *Química de los alimentos*. Zaragoza: Acribia, 1993.

FIOCRUZ. Fundação Oswaldo Cruz. **Doença de Chagas: Açai contaminado com parasita pode transmitir doença de Chagas**. Rio de Janeiro, 2010.

FITZPATRICK, J.J.; AHRNÉ, L. Food powder handling and processing: Industry problems, knowledge barriers and research opportunities. **Chemical Engineering and Processing**, vol. 44, p. 209-214, 2005.

FORNY, L.; MARABI, A.; PALZER, S. Wetting, disintegration and dissolution of agglomerated water soluble powders. **Powder Technology**, vol. 206, p. 72-78, 2011.

FOUST, A.S. et al. *Princípios das Operações Unitárias*. Editora: LTC, 2 edição, 1982.

GEANKOPLIS, Christie J. *Transport Processes and Unit Operations*. Prentice-Hall International, Inc. 3. th. E.U.A, 1993.

GIUSTI, M.; WROLSTAD, R.E. Characterization and Measurement of anthocyanins by UV-Visible Spectroscopy. **Current Protocols in Food Analytical Chemistry**, vol. 61, p. 322-326, 2001.

GORDON, André et al. Chemical characterization and evaluation of antioxidant properties of Açaí fruits (*Euterpe oleracea* Mart.) during ripening. **Food Chemistry**, vol. 133, p. 256-263, 2012.

GOULA, Athanasia M.; ADAMOPOULOS, Konstantinos. Effect of Maltodextrin Addition during Spray Drying of Tomato Pulp in Dehumidified Air: II. Powder Properties. **Drying Technology**, vol. 26, p. 726-737, 2008.

GOULA, Athanasia M.; ADAMOPOULOS, Konstantinos. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties. **Journal of Food Engineering**, vol. 66, p. 35-42, 2005.

GUIMARÃES, Daniela Helena Pelegrine; MASCIGRANDE, Daniel Donatelli. Polpas de Juçara e Açaí: diferenças reológicas em função da temperatura e teor de sólidos suspensos. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, vol. 4, p. 169-181, 2011.

HELLSTRÖM, Jarkko; MATTILA, Pirjo; KARJALAINEN, Reijo. Stability of anthocyanins in berry juices stored at different temperatures. **Journal of Food Composition and Analysis**, vol. 31, p. 12-19, 2013.

HENDERSON, Andrew; GALEANO, Gloria. Euterpe, Prestoea, and Neonicholsonia (Palmae). **Flora Neotropica**, vol. 72, p. 1-89, 1996.

HERMAN-LARA, Erasmo et al. Effect of the Refractance WindowsTM drying technique on some physical and chemical characteristics in carrot. **Drying Technology**. Manuscript: LDRT-2014-0214, 2014.

HOGKAMP, S.; POHL, M. Porosity measurement of fragile agglomerates. **Powder Technology**, vol. 130, p. 385-392, 2003.

HOGKAMP, S.; SCHUBERT, H. Rehydration of Food Powders. **Food Science Technology International**, vol. 9, p. 223-235, 2003.

HOTZA, Dachamir. Artigo revisão: colagem de folhas cerâmicas. **Cerâmica**, vol. 43, p. 283-284, 1997.

HOTZA, D.; GREIL, P. Review: aqueous tape casting of ceramic powders. **Materials Science and Engineering A**, vol. 202, p. 206-217, 1995.

IAL. Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo, 2008.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Quantidade e valor dos produtos da extração vegetal, por produtos, segundo as Grandes Regiões e as Unidades de Federação**. Brasília, 2013.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT David P. *Fundamentos da Transferência de Calor e Massa*. Editora Guanabara Koogan S. A., 1992.

JANGAM, Sachin V.; LAW, Chung Lim; MUJUMDAR, Arun S. *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*. Volume 1, 2010.

KEYY, R.B. *DRYING: Principles and Practice*. Nova Zelândia, 1975.

KENG, E.Y.H. Air and helium pycnometer. **Powder Technology**, vol. 3, p. 179-180, 1970.

KISAND, V. et al. Preparation of structured sol-gel films using tape casting method. **Materials Science and Engineering B**, vol. 137, p. 162-165, 2007.

KUS, Piotr Marek et al. Antioxidant activity, color characteristics, total phenol content and general HPLC fingerprints of six Polish unifloral

honey types. **LWT – Food Science and Technology**, vol. 55, p. 124-130, 2014.

LAZGHAB, Mariem et al. Wettability assessment of finely divided solids. **Powder Technology**, vol. 157, p. 79-91, 2005.

LICHTENTHÄLER, Ramona et al. Total oxidant scavenging capacities of *Euperte oleracea* Mart. (Açaí) fruits. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, vol. 56, p. 53-64, 2005.

LORENZI, Harri et al. *Palmeiras no Brasil – nativas e exóticas*. Editora Plantarum Ltda, SP, 1996.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Portaria nº. 1.039**. Brasília, 2008.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Coleção Agroindústria Familiar: Açaí Congelado**. Brasília, 2007.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regulamento Técnico** Geral para fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade para polpa de fruta. Brasília, 2000.

MENEZES, Ellen Mayra da Silva. **Efeito da alta pressão hidrostática em polpa de açaí pré-congelada (*Euterpe oleracea*, Mart.)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2005.

MIGUEL, J.R.; SILVA, M.A.M.; DUQUE, J.C.C. Levantamento de palmeiras (arecaceae) cultivadas na universidade do Grande Rio, Campus I – Duque de Caxias – RJ. **Saúde & Ambiente em Revista**, v.2, n.1, p.26-36, 2007.

MINOLTA, K. Sensing Americas. Instrumentos de Medición. Disponível em: <

<http://sensing.konicaminolta.com.br/2013/11/entendendo-o-espaco-de-cor-lab/>> . Acesso em: junho/2015.

MORAES, Jaqueline Oliveira de. **Produção e caracterização de filmes de amido-glicerol-fibras de celulose elaborados por *tape-casting***. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

NASCIMENTO et al. Composição em ácidos graxos do óleo da polpa de açaí extraído com enzimas e com hexano. **Revista Brasileira de Fruticultura**, vol. 30, p. 498-502, 2008.

NAKAGAWA, K.; OCHIAI, T. A mathematical model of multi-dimensional freeze-drying for foods products. **Journal of Food Engineering**, vol. 161, p. 55-67

NIJDAM, J.J.; LANGRISH, T.A.G. The effect of surface composition on the functional properties of milk powders. **Journal of Food Engineering**, vol. 77, p. 919-925, 2006.

NINDO, C.I.; POWERS, J.R.; TANG, J. Influence of Refractance Window evaporation on quality of juices from small fruits. **LWT – Food Science and Technology**, vol.40, p.1000-1007, 2007.

NINDO, C.I.; TANG, J. Refractance Window Dehydration Technology: A novel Contact Drying Method. **Drying Technology**, vol. 25, p. 37-48, 2007.

NINDO, C.I. et al. Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. **Journal of Food Processing Preservation**, vol. 27, p. 117-136, 2003.

OBÓN, J.M. et al. Production of a red-purple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems. **Journal of Food Engineering**, vol. 90, p. 471-479, 2009.

OCHOA-MARTÍNEZ, C.I. et al. Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. **Journal of Food Engineering**, vol. 109, p. 69-75, 2012.

OLIVEIRA, Maria do Socorro Padilha; NETO, João Tomé de Farias; PENA, Rosinelson da Silva. Açai: técnicas de cultivo e processamento. **Semana da Fruticultura, Floricultura e Agroindústria/ VII Flor Pará**. HANGAR, Belém – Pará, 2007.

ORTIZ-JEREZ, M.J.; OCHOA-MARTÍNEZ, C.I. Heat Transfer Mechanisms in Conductive Hydro-Drying of Pumpkin (*Cucurbita maxima*) Pieces. **Drying Technology: A International Journal**, vol. 33, p. 965-972, <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2015.1009538>, 2015.

ORTIZ-JEREZ, M. J. et al. Quantitative Understanding of Refractance Window™ Drying. **Food and Bioproducts Processing** (2015). <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2015.05.010>

PACHECO-PALENCIA, Lisbeth A.; DUNCAN, Christopher E.; TALCOTT, Stephen T. Phytochemical composition and thermal stability of two commercial açai species, *Euterpe oleracea* and *Euterpe precatoria*. **Food Chemistry**, vol. 115, p. 1199-1205, 2009.

PACHECO-PALENCIA, Lisbeth A.; HAWKEN, Palo; TALCOTT, Stephen T. Juice matrix composition and ascorbic acid fortification effects on the phytochemical, antioxidant and pigment stability of açai (*Euterpe oleracea* Mart.). **Food Chemistry**, vol. 105, p. 28-35, 2007a.

PACHECO-PALENCIA, Lisbeth A.; HAWKEN, Palo; TALCOTT, Stephen T. Phytochemical, antioxidant and pigment stability of açai (*Euterpe oleracea* Mart.) as affected by clarification, ascorbic acid fortification and storage. **Food Research International**, vol. 40, p. 620-628, 2007b.

PARK, K.J.; YADO, M.K.M.; BROD, F.P.R. Estudo de secagem de pêra Bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, n. 21, p. 288-292, 2001.

PAVAN, Mariana A.; SCHIMIDT, Shelly J.; FENG, Hao. Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air dried açai (*Euterpe oleracea* Martius) juice. **LWT – Food Science and Technology**, vol. 48, p. 75-81, 2012.

PAVAN, Mariana A. **Effects of Freeze Drying, Refractance Window drying and Hot-air drying on the quality parameters of açai**. Dissertação de mestrado. Universidade de Illinois, 2010.

POLIFER. Notícias: Perspectivas da Fruticultura Brasileira. (Disponível em: <http://www.grupopolifer.com.br/?link=noticias/noticia.php&id=47>). Acesso em 24/06/2015.

QUEIROZ, José Antônio Leite; MELÉM Jr, Nagib Jorge. Efeito do tamanho do recipiente sobre o desenvolvimento de mudas de açai (*Euterpe oleracea* Mart.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, vol. 23, p. 460-462, 2001.

RAHMAN, M. Schafiur; LABUZA, Theodore P. *Handbook of food preservation*. 2.th. Water Activity and Food Preservation (Cap. 20). Nova Iorque, E.U.A.: CRC Press, 2007.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. **Journal of Food Engineering**, vol. 49, p. 311-319, 2001.

RE, R. et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology and Medicine**, vol. 26, p. 1231-1237, 1999.

REETZ, Ema Regina et al. *Anuário Brasileiro da Fruticultura 2015*. Editora Gazeta Santa Cruz, Santa Cruz do Sul, 2015.

ROSSO, Veridiana Vera et al. Determination of anthocyanins from acerola (*Malpighia emarginata* DC.) and açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) by HPLC-PDA-MS/MS. **Journal of Food Composition and Analysis**, vol. 21, p. 291-299, 2008.

SCHAICH, K.M.; TIAN, X.; XIE, J. Hurdles and pitfalls in measuring antioxidant efficacy: A critical evaluation of ABTS, DPPH, and ORAC assays. **Journal of Functional Foods**, vol. 14, p. 111-125, 2015.

SCHAUSS, A.G. et al. Phytochemical and nutrient composition of the freeze-dried Amazonian palm berry, *Euterpe oleracea* Mart. (acai). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, vol. 54, p. 8598-8603, 2006.

SCHUBERT, H. Food Particle Technology. Part I: Properties of Particles and Particulate Food Systems. **Journal of Food Engineering**, vol. 6, p. 1-32, 1987.

SEAB. Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento: Departamento de Economia Rural. **Fruticultura – Análise da Conjuntura Agropecuária**. Curitiba, 2012.

SECEX. Ministério da Secretaria de Comércio Exterior. **Brasil: exportação de frutas secas**. Brasília, 2006.

SETYADJIT; SUKASIH, Ermi. Effect of Addition of Filler on the Production of Shallot (*Allium cepa* var. *ascalonicum* L.) Powder with Drum Dryer. **Procedia Food Science**, vol. 3, p. 396-408, 2015.

SEHN, Elizandra. **Dinâmica da desnaturação térmica das proteínas do sangue e fotoestabilidade de formulações de uso tópico: Estudo quantitativo com métodos fototérmicos**. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

SILVA, J.J.M.; ROGEZ, H. Avaliação da estabilidade oxidativa do óleo bruto de açaí (*Euterpe oleracea*) na presença de compostos fenólicos

puros ou de extratos vegetais amazônicos. **Química Nova**, vol. 36, p. 400-406, 2013.

SINGLETON, V.L.; ORTHORFER, R.; LAMUELA-RAVENTÓS, R.M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. **Methods in Enzymology**, vol. 299, p. 152-178, 1999.

SOSNIK, Alejandro; SEREMETA, Katia P. Advantages and challenges of the spray-drying technology for the production of pure drug particles and drug-loaded polymeric carriers. **Advances in Colloid and Interface Science**, vol. 223, p. 40-54, 2015.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. *Drying: principles, applications and design*. Gordon and Breach Science Publishers, vol. 3. Suíça, 1986.

TONON, Renata V.; BRABET, Catherine; HUBINGER, Míriam D. Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice produced with different carrier agents. **Food Research International**, vol. 43, p. 907-914, 2010.

TONON, Renata V. et al. Steady and dynamic shear rheological properties of açai pulp (*Euterpe oleracea* Mart.). **Journal of Food Engineering**, vol. 92, p. 425-431, 2009.

TONON, Renata V.; BRABET, Catherine; HUBINGER, Míriam D. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray-drying. **Journal of Food Engineering**, vol. 88, p. 411-418, 2008.

VEGA-MERCADO, Humberto; GÓNGORA-NIETO, Marcela; BARBOSA-CÁNOVAS, Gustavo V. Advances in dehydration of foods. **Journal of Food Engineering**, vol. 49, p. 271-289, 2001.

ZOTARELLI, Marta F.; CARCIOFI, Bruno A.; LAURINDO, João B. Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by

Refractance Window. **Food Research International**, vol. 69, p. 410-417, 2015.

ZOTARELLI, Marta Fernanda. **Produção e caracterização de manga desidratada em pó por diferentes processos de secagem**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

WANG, Hong; CAO, Guohua; PRIOR, Ronald L. Oxygen Radical Absorbing Capacity of Anthocyanins. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, vol. 45, p. 304-309, 1997.

WELTY, J.R et al. *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*. 5th edition, 2007.

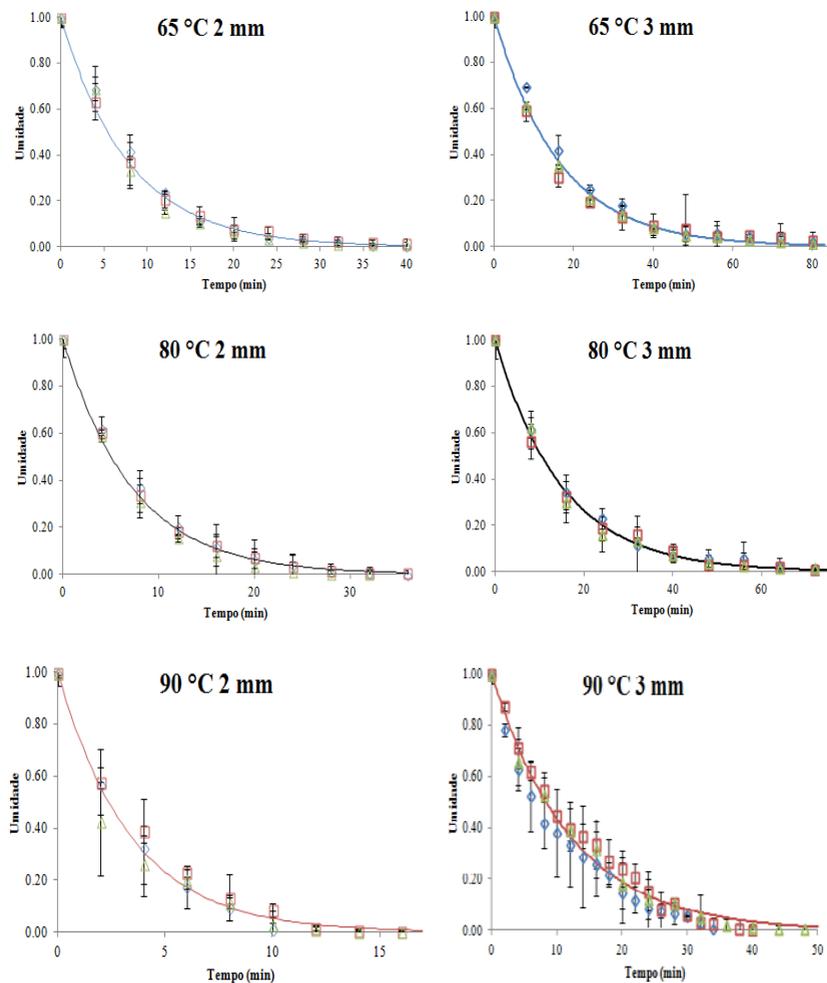
WROLSTAD, R.E. Anthocyanin Pigments – Bioactivity and Coloring Properties. **Journal of Food Science**, vol. 69, p. C419-C425, 2004.

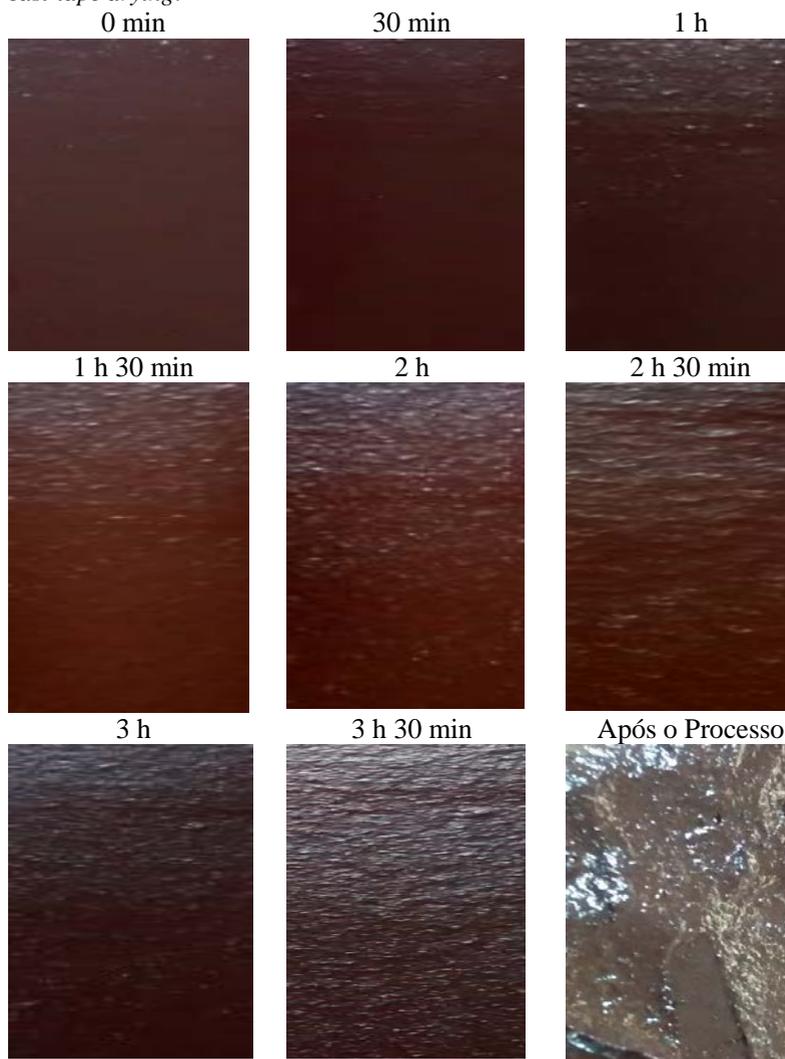
YAMAGUCHI, Klenicy Kazumy de Lima et al. Amazon açai: Chemistry and biological activities: A review. **Food Chemistry**, vol. 179, p. 137-151, 2015.

YU, Mingxian et al. Optimization of the tape casting process for development of high performance alumina ceramics. **Ceramics International**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.08.010> , 2015.

ANEXO A

Figura A – Triplicatas dos dados da evolução temporal da umidade adimensionalizada em relação à umidade da amostra in natura, representados pelos diferentes ícones com os respectivos desvios-padrão. Os modelos exponenciais ajustados são apresentados como curvas contínuas.



ANEXO B**Figura B** - Secagem convectiva de polpa de açaí com 3 mm de espessura em *cast-tape drying*.

ANEXO C

Figura A – Imagens termográficas da superfície da polpa de açaí durante a secagem à 65 °C e 2 mm em TCD nos tempos de 0,25 (a); 3 (b); 6 (c); 9 (d); 21 (e) e 36 (f) min.

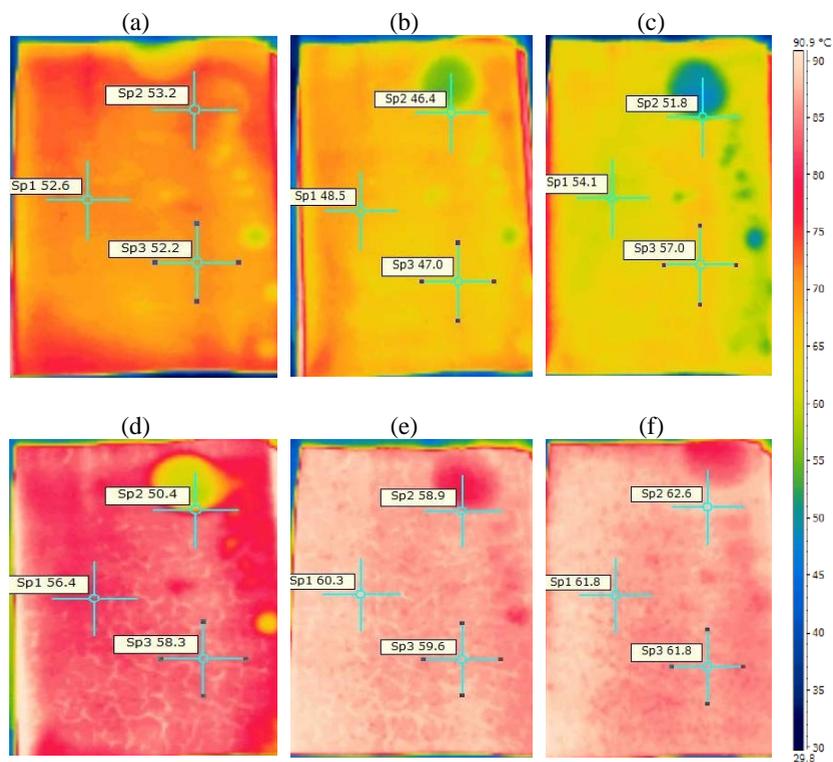


Figura B - Imagens termográficas da superfície da polpa de açaí durante a secagem a 65 °C e 3 mm nos tempos de 0,25 (a); 3 (b); 12 (c); 15 (d); 21 (e) e 60 (f) min.

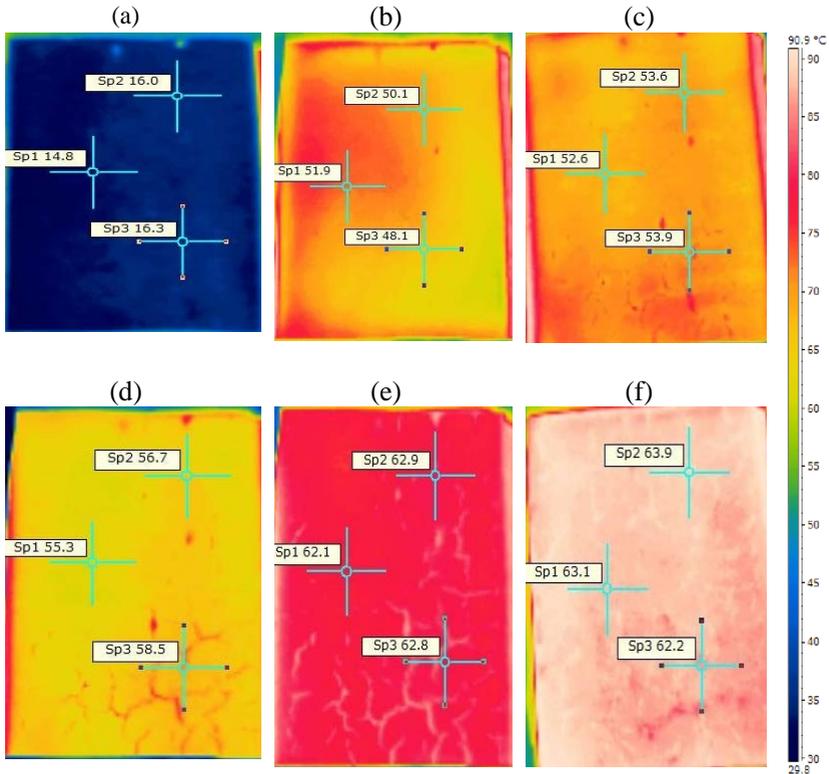


Figura C - Imagens termográficas da superfície da polpa de açaí durante a secagem a 80 °C e 2 mm nos tempos de 0,25 (a); 3 (b); 6 (c); 9 (d); 12 (e) e 36 (f) min.

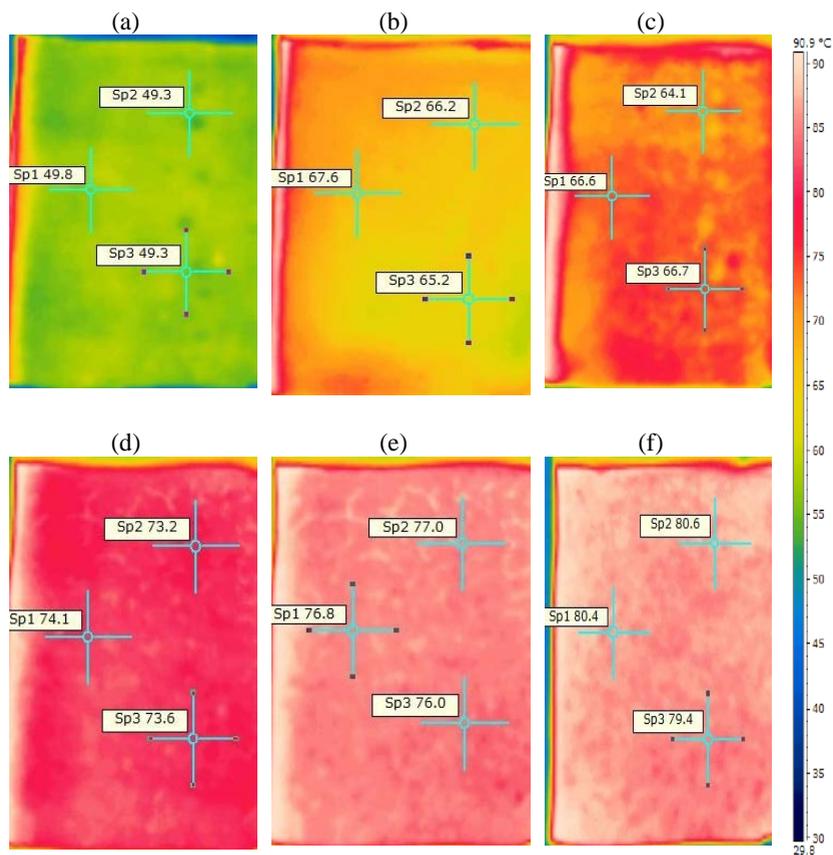


Figura D - Imagens termográficas da superfície da polpa de açaí durante a secagem a 80 °C e 3 mm nos tempos de 0,25 (a); 3 (b); 9 (c); 12 (d); 21 (e) e 75 (f) min.

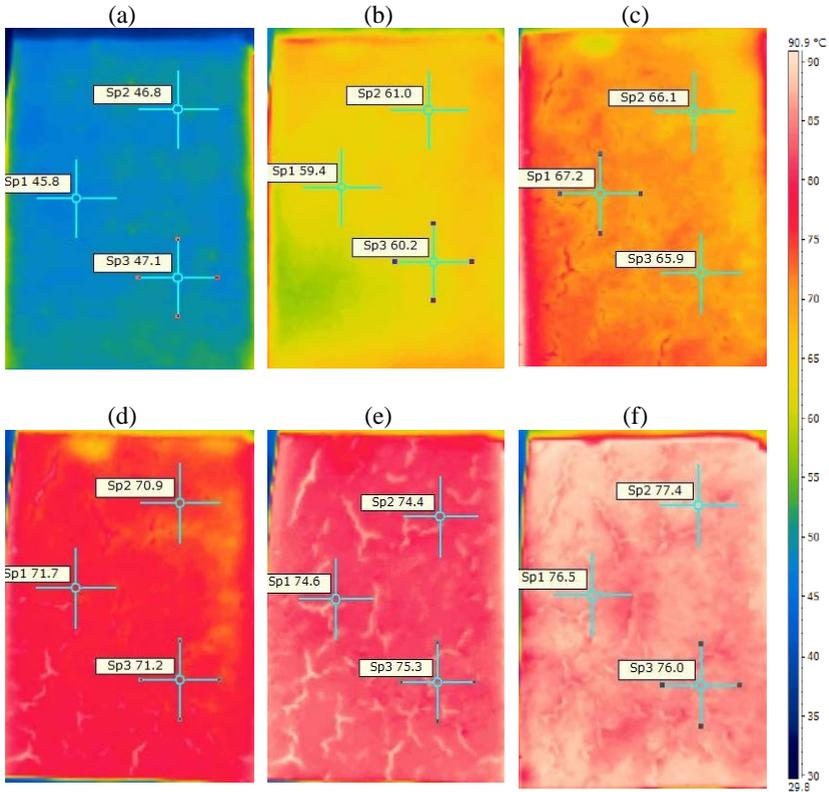


Figura E - Imagens termográficas da superfície da polpa de açaí durante a secagem a 90 °C e 2 mm nos tempos de 0,25 (a); 3 (b); 6 (c) e 17 (d) min.

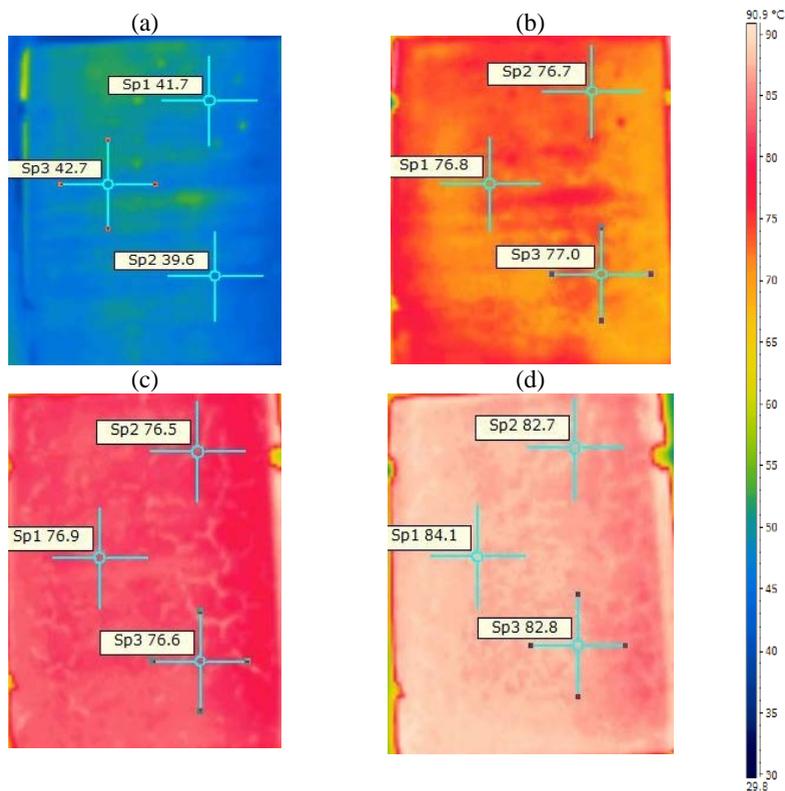
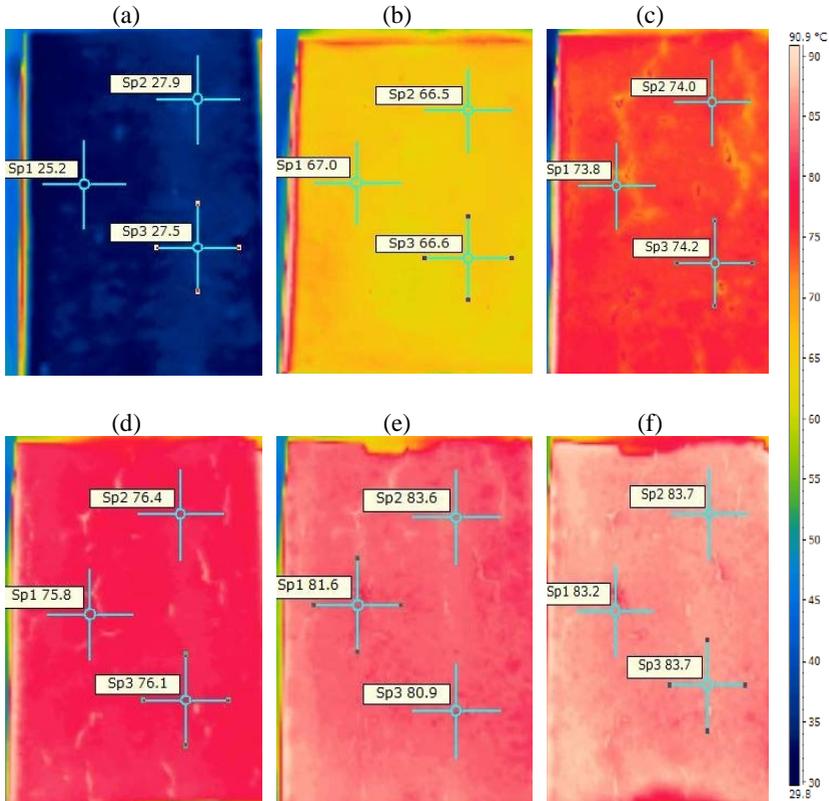


Figura F - Imagens termográficas da superfície da polpa de açaí durante a secagem a 90 °C e 3 mm nos tempos de 0,25 (a); 3 (b); 6 (c); 12 (d); 27 (e); 33 (f); 36 (g); 42 (h); 45 (i); 51 (j); 57 (k) e 60 (l) min. O abaixamento da temperatura a partir do tempo de 36 min é resultado do descolamento da polpa, formando uma camada de ar entre a polpa e o *Mylar*, o que gera mais uma resistência a transferência de calor.



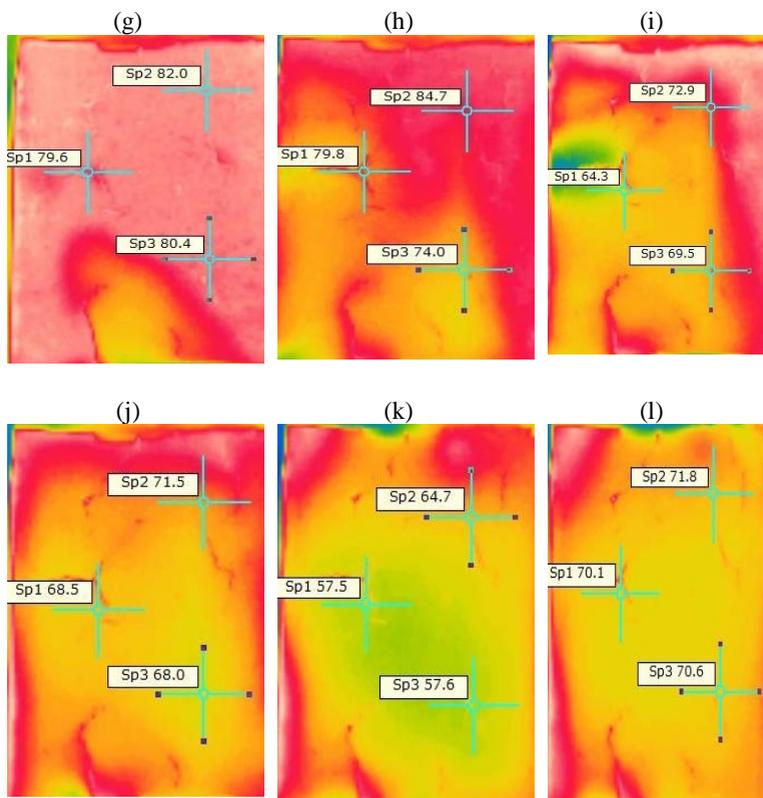
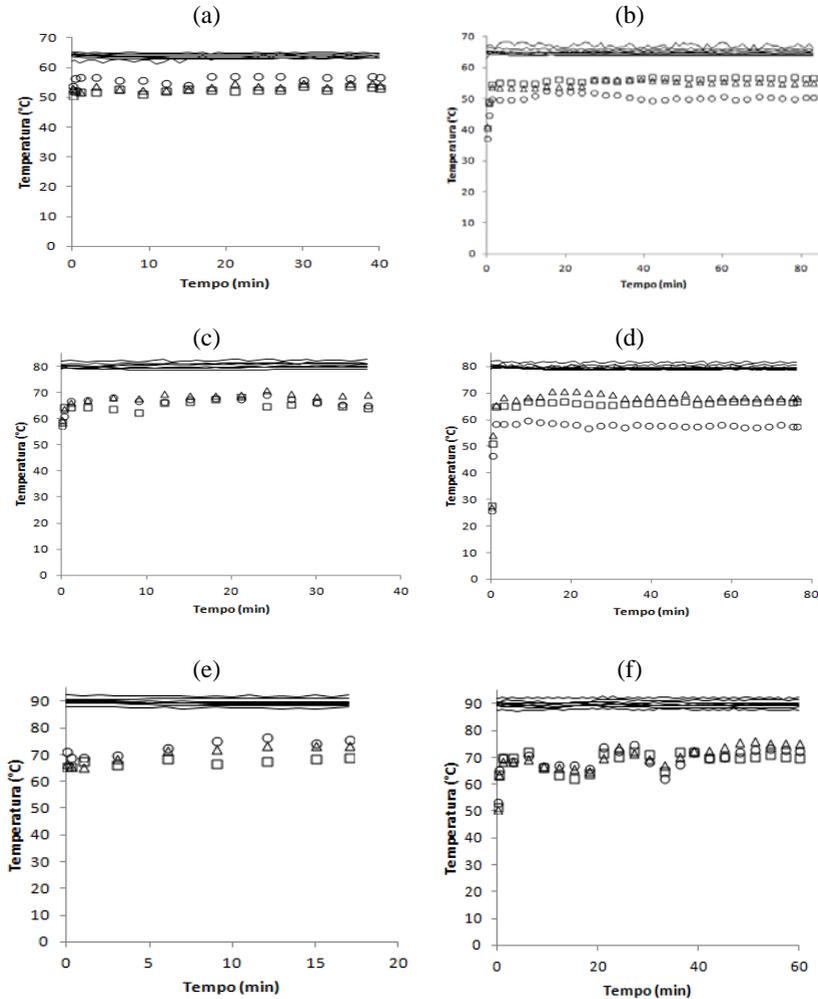


Figura G - Perfis de temperatura nas condições de 65 °C e espessuras 2 (a) e 3 (b) mm; 80 °C nas espessuras de 2 (c) e 3 (d) mm e 90 °C nas espessuras de 2 (e) e 3 (f) mm. As linhas contínuas se referem aos termopares em contato com a água de aquecimento e os pontos \square , Δ , \circ representam a posição dos termopares na polpa correspondentes aos pontos Sp1, Sp2 e Sp3 nas termografias, respectivamente.



ANEXO E

Figura A – Comportamento tixotrópico observado nas polpas reconstituídas a partir dos pós produzidos nas condições de 65 °C e espessuras 2 (a) e 3 (b) mm; 80 °C nas espessuras de 2 (c) e 3 (d) mm; 90 °C nas espessuras de 2 (e) e 3 (f) mm; liofilizado (g) e da matéria-prima (h) . Os pontos \square , Δ , \diamond são correspondentes às triplicatas.

