



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS



TESE

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS

ALTERNATIVAS PARA AS ETAPAS DE TORRA E DESPELICULAGEM NO
PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE AMÊNDOAS DE CASTANHAS DE
CAJU

RAFAELA DUARTE ALMEIDA ARAUJO

Orientadores: Prof. Dra. Maria Elita Martins Duarte

Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

Campina Grande - PB

2021

RAFAELA DUARTE ALMEIDA ARAUJO

**ALTERNATIVAS PARA AS ETAPAS DE TORRA E DESPELICULAGEM NO
PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE AMÊNDOAS DE CASTANHAS DE
CAJU**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título Doutor em Engenharia de Processos.

Orientadores: Prof. Dra. Maria Elita Martins Duarte

Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

Campina Grande - PB

2021

A663a Araujo, Rafaela Duarte Almeida.
Alternativas para as etapas de torra e despêliculagem no processo de beneficiamento de amêndoas de castanhas de caju / Rafaela Duarte Almeida Araujo. – Campina Grande, 2021.
124 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.
"Orientação: Prof. Dr. Maria Elita Martins Duarte, Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti-Mata".
Referências.

1. Desenvolvimento de Processos. 2. Castanha de Caju (*Anacardium occidentale* L.). 3. Agroindústria. 4. Amêndoa – Secagem e Beneficiamento. I. Duarte, Maria Elita Martins. II. Cavalcanti-Mata, Mario Eduardo Rangel Moreira. III. Título.

CDU 66.09:634.573(043)

RAFAELA DUARTE ALMEIDA ARAUJO




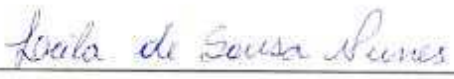
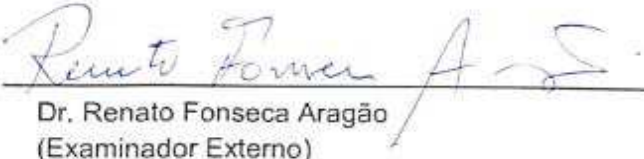
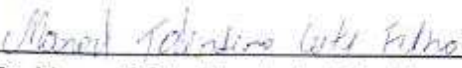
**ALTERNATIVAS PARA AS ETAPAS DE TORRA E DESPELICULAGEM NO
PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE AMÊNDOAS DE CASTANHAS DE
CAJU**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, pertencente a área de concentração Desenvolvimentos de Processos, como requisito para a obtenção do Título de Doutora em Engenharia de Processos.

Aprovada em: 09 de fevereiro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

PARECER

 _____ Prof. ^a . Dr. ^a . Maria Elita Martins Duarte (UFCG – Orientadora)	<u>APROVADO</u>
 _____ Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata (UFCG – Orientador)	<u>APROVADO</u>
 _____ Prof. Dr. Marcos José de Almeida Gama (UFCG – Examinador Externo)	<u>APROVADO</u>
 _____ Dr. ^a . Leila de Souza Nunes (UFCG – Examinador Externo)	<u>Aprovado</u>
 _____ Dr. Renato Fonseca Aragão (Examinador Externo)	<u>Aprovado</u>
 _____ Dr. Manoel Tolentino Leite Sobrinho (Examinador Externo)	<u>Aprovado</u>

“Deus sempre abençoa o esforço da busca.”

Celina Borges

**Dedico esse trabalho a
meu filho, meus pais,
minha irmã e minha tia.**

AGRADECIMENTOS

A DEUS, que conduz todos os meus caminhos e, em todos os dias de minha vida, me dá forças para nunca desistir dos meus sonhos.

Ao meu Pai Joaquim Lins e minha Mãe Socorro Duarte que com orgulho e entusiasmo comemoram juntos comigo cada vitória em minha vida. É com muita felicidade que tenho prazer em agradecê-los pela motivação e amor que me fizeram correr atrás das conquistas.

À minha Irmã que com cuidado e muito carinho acompanhou cada etapa desse doutorado, me incentivando e dando forças para alcançar a titulação de doutora. Muito obrigada Tati!

Aos meus avós que, com orgulho, diziam a todos “essa minha neta faz doutorado na UFCG”, saibam que cada olhar de orgulho me estimulava a vencer essa etapa e assim chegar ao final.

À minha família, tios e tias maternos, tias paternas, e primos, que acompanharam e vibraram com felicidade cada conquista profissional em minha vida, os quais sempre me esperavam com um abraço caloroso de alegria. Não posso deixar de citar minha Tia Elita, professora universitária, que com tanto entusiasmo me motivou para a vida acadêmica, nem meu primo Alisson que, com tanto entusiasmo e zelo, ajudou a materializar o maquinário desenvolvido nessa pesquisa.

Aos meus amigos. Ah, que amigos! Amigos esses que estão sempre ao meu lado me divertindo, levantando, motivando e rezando, comemorando cada conquista e assim perdoando minha ausência em tantos momentos os quais eu estava dedicada aos estudos.

A minha querida professora orientadora Dra. Elita Martins Duarte, que vibrou comigo desde a aprovação, acompanhou e ajudou com todas as dificuldades acadêmicas e inclusive pessoal, e com muita paciência e bom humor me orientou e contribuiu em todos os momentos do meu trabalho, lendo e relendo quantas vezes fossem necessários. Ao meu orientador Dr. Mario Eduardo que sugeriu, acompanhou todo o trabalho, sempre zelando pela qualidade e fidelidade dos dados coletados, além de sempre expressar uma torcida para alcançar minha realização pessoal. Meu muito obrigada!

A banca avaliadora que acreditou no projeto desde o princípio, quando diziam que esse estudo era importante e ia ser relevante para área, e esteve presente em todas as etapas do desenvolvimento da pesquisa com contribuições pertinentes.

Aos professores Doutores da pós-graduação de Design e Engenharia de Processos que fizeram de cada aula um momento de encontro e troca de conhecimentos bastante prazerosos.

Aos meus colegas de doutorado, junto com vocês passei por momentos de felicidade, muitas descobertas, ajuda mútua, correrias para dar conta do volume de trabalhos e leituras para realizar. Em especial, agradeço a Manoel e Anastácia que estiveram presentes sempre, dando apoio e orientação.

Aos professores da graduação de Design da UFCG, que acompanharam e me motivaram no desenvolvimento dessa pesquisa, vibrando e torcendo pela realização dessa pós-graduação.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivo geral.....	21
1.1.2 Objetivos específicos	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Dados de produção da castanha de caju.....	23
2.1.1 Consumo mundial de castanha de caju.....	23
2.2 Características gerais da castanha de caju	24
2.2.1 Processamento para obtenção da amêndoa de castanha de caju	26
2.3 Classificação da amêndoa de castanha de caju	27
2.4 Processo de beneficiamento de castanha de caju	32
2.5 Propriedades físicas	35
2.5.1 Teor de água.....	35
2.5.2 Tamanho e massa	35
2.5.3 Massa específica e porosidade.....	35
2.5.4 Volume.....	35
2.5.5 Parâmetros de crocância	35
2.5.6 Análise de cor	37
2.6 Secagem.....	37
2.6.1 Modelos matemáticos de secagem em camada fina	40
2.6.2 Entalpia, entropia e energia livre de Gibbs	46
3. MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1 Matéria prima	47
3.2 Seleção.....	47
3.3 Caracterização das amêndoas de castanha de caju	47
3.3.1 Teor de água	47
3.3.2 Tamanho e massa.....	48
3.3.3 Volume	48

3.3.4	Massa específica real, aparente e porosidade	48
3.3.5	Área superficial	48
3.3.6	Parâmetros de crocância	49
3.3.7	Processamento proposto para beneficiamento da amêndoa de castanha de caju	49
	Despeliculagem	53
3.3.8	Análise da cor	57
3.4	Análise estatística	58
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	Características das amêndoas de castanha de caju <i>in natura</i> (cruas)	59
4.1.1	Teor de água	59
4.1.2	Tamanho	59
4.1.3	Massa, volume, massa específica real, massa específica aparente e porosidade	59
4.1.4	Crocância da amêndoa <i>in natura</i>	60
4.2	Secagem	60
4.2.1	Cinética de secagem	60
4.2.2	Taxa constante	61
4.2.2.1	Coeficiente de transferência de massa convectivo	63
4.2.3	Taxa Decrescente	65
4.2.4	Energia de ativação, entalpia, entropia e energia livre de Gibbs	745
4.3	Desenvolvimento do despeliculador	77
4.4	Despeliculagem das castanhas	82
4.4.1	Índice de quebra das amêndoas	84
4.4.2	Índice de despeliculagem das amêndoas	91
4.5	Medidas físicas das amêndoas de castanha de caju após secagem e despeliculagem	98

4.5.1	Teor de água	98
4.5.2	Medidas físicas das amêndoas pós- secagem	98
4.5.2.1	Tamanho	das
	amêndoas.....	98
4.5.2.2	Massa, volume, massa específica real e aparente e porosidade.....	99
4.5.2.3	Avaliação instrumental de crocância	100
4.5.2.4	Cor das Amêndoas	101
5.	CONCLUSÕES.....	108
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
APÊNDICE A	119
APÊNDICE B1	121
APÊNDICE B2	121
APÊNDICE B3	121
APÊNDICE B4	122
APÊNDICE B5	122
APÊNDICE B6	122
APÊNDICE B7	123
APÊNDICE B8	123
APÊNDICE C	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Geometria da castanha de caju (adaptado de CAMARA, 2010) ...	25
Figura 02 - Classificação de amêndoas de castanha de caju inteiras – conforme o FAO (2015), CACEX (2003) e o Ministério da Agricultura do Brasil (BRASIL, 2009).	28
Figura 03 - Classificação de amêndoas de castanha de caju quebradas conforme a FAO (2015), CACEX (2003) e o Ministério da Agricultura do Brasil (BRASIL, 2009).	29
Figura 04 - Classificação de amêndoas de castanha de caju granuladas conforme a FAO (2015), CACEX (2003) e o Ministério da Agricultura do Brasil (BRASIL, 2009).	30
Figura 05 - Fluxograma das etapas de processamento de castanha de caju, praticado nas indústrias de beneficiamento de castanha de caju (PAIVA et al.,2006).....	32
Figura 06 - Curva típica de uma análise instrumental do perfil de textura (TPA)	37
Figura 07 - Curvas de secagem: evolução do teor de água do produto (X), de sua temperatura (T) e da velocidade de secagem (dX/dt).	38
Figura 08 - Desenho esquemático da castanha de caju, mostrando a semelhança com cilindro.....	43
Figura 09 - Fluxograma das etapas de beneficiamento de castanha de caju proposto para esta pesquisa.	50
Figura 10 - Fluxograma com descrição do processo de criação do despeliculador	53
Figura 11 - Descrição dos ajustes necessários no protótipo do maquinário desenvolvido	56
Figura 12 - Pontos de coleta de cor para análise	58
Figura 13 - Dados experimentais da secagem de castanha de caju nas temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C com velocidade do ar de 3m.s ⁻¹	61

Figura 22 - Curvas de secagem de amêndoas de castanha de caju obtidas às temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C, velocidade do ar de secagem de 3m.s ⁻¹ , com ajustes segundo o modelo Page.	68
Figura 28 - Esquema com partes e componentes elétricos do maquinário	82
Figura 30 - Índices de quebra de amêndoas de castanha de caju, para a temperatura de torra de 140°C, classificadas conforme a FAO (2005) e CACEX (2003).....	86
Figura 31 - Índices de quebra de amêndoas de castanha de caju, para a temperatura de torra de 160°C, classificadas conforme a FAO (2005) e CACEX (2003).....	87
Figura 32 - Índices de quebra de amêndoas de castanha de caju, para a temperatura de torra de 180°C, classificadas conforme a FAO (2005) e CACEX (2003).....	88
Figura 37 - Imagens das amêndoas de castanhas de caju submetidas às torras em diferentes temperaturas.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Produtividade da castanha do caju nos principais estados do nordeste	23
Tabela 02 - Massa da castanha de caju e partes que a compõem.....	25
Tabela 03 - Composição química da amêndoa da castanha de caju in natura	26
Tabela 04 - Primeiras seis raízes da função de Bessel de primeiro tipo e de ordem zero (SOUSA, 2017)	42
Tabela 05 - Média das dimensões das amêndoas in natura.....	59
Tabela 06 - Valores médios da massa (g), massa específica real (ρ), volume por deslocamento e porosidade (ϵ) da castanha de caju.	60
Tabela 07 - Dados técnicos do período de taxa constante de secagem de castanha de caju determinando-se o coeficiente de transferência de massa convectivo global, $m.s^{-1}$ (h_m) e o coeficiente de transferência de calor convectivo global $W.m.s^{-2^\circ C}$ (h_c).....	64
Tabela 08 - Parâmetros obtidos pelo ajustado modelo proposto por Fick aos dados experimentais de secagem de amêndoas de castanha de caju, nas temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C e velocidade do ar 3m/s, por meio de regressão não linear.....	71
Tabela 09 - Parâmetros obtidos pelo ajuste do modelo proposto por Page, Cavalcanti Mata e Henderson e Pabis por meio de regressão não linear para diferentes condições de temperatura	72
Tabela 10 - Valores da energia de ativação para a amendoa de castanha de caju durante as cinéticas de secagem nas temperaturas de secagem de 120, 140, 160 e 180°C, para os modelos matemáticos de Fick, Page, Cavalcanti Mata e Henderson e Pabis.	74
Tabela 11 - Propriedades termodinâmicas obtidas pela cinética de secagem da castanha de caju nas temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C: entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG) para o modelo matemáticos Fick, Page, Cavalcanti Mata e Henderson ..	75
Tabela 12 - Partes de componentes do despeliculador de amêndoas de castanha de caju, desenvolvido nesta pesquisa.....	79
Tabela 13 - Parâmetros utilizados para o experimento de despeliculagem.....	83

Tabela 14 - Escalas de classificação das amêndoas.....	84
Tabela 15 - Quadro de análise de variância dos valores médios de de quebra de amêndoas de castanha quando submetidas a diferentes Temperaturas de Secagem e diferentes períodos de Tempo de Permanência no despeliculador.	89
Tabela 16 - Comparação entre as médias dos valores de amêndoas de castanha de caju inteiras(%), devido as Temperaturas de Secagem	90
Tabela 17 - Comparação entre as médias dos valores de amêndoas de castanha de caju inteiras (%), devido ao Tempo de permanência no despeliculador	91
Tabela 18 - Quadro de análise de variância dos valores médios de de quebra de amêndoas de castanha quando submetidas a diferentes Temperaturas de Secagem e diferentes períodos de Tempo de Permanência no despeliculador.	96
Tabela 19 - Análise estatística de interação entre temperatura e despeliculagem	97
Tabela 20 - Comparação entre as médias dos valores de amêndoas de castanha de caju totalmente despeliculadas (%), devido ao Tempo de permanência no despeliculador.....	97
Tabela 21 - – Compração entre os valores médios dos diâmetros da Amêndoas de castanna de caju no in natura, e após cada etapa do beneficiamento proposto.	98
Tabela 22 - Comparação entre os valores médios da crocância da castanha do caju em função dos tratamentos de secagem	101
Tabela 23 - Parâmetros de cor coletados nas castanhas por diferentes pontos de coleta em função da temperatura.	103
Tabela 24 -Quadro de análise de variância da temperatura de torra e captação de cor em três pontos da amêndoa para análise do parâmetro A.	104
Tabela 25 - Quadro de análise de variância da temperatura de torra e captação de cor em três pontos da amêndoa para análise do parâmetro B.	104

Tabela 26 - Quadro de análise de variância da temperatura de torra e captação de cor em três pontos da amêndoa para análise do parâmetro L.
..... 105

Tabela 27 - Quadro de análise de variância da temperatura de torra e captação de cor em três pontos da amêndoa para análise do parâmetro L.
..... 106

RESUMO

A retirada da película da castanha de caju é a grande responsável pelos altos índices de quebra da amêndoa e a etapa de fritura exerce influência direta na cor do produto. Por estes motivos, os maiores gargalos tecnológicos sofrido pela indústria de beneficiamento da castanha encontram-se nestas duas etapas, apesar de não serem as únicas responsáveis pelos danos. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver novas alternativas tecnológicas para as etapas de fritura (secagem/torra) e despeliculagem das amêndoas de castanha de caju e, para alcançar estes objetivos, foi necessário estudar as variações das características físicas das amêndoas e após cada etapa de processamento de torra e despeliculamento; estudar a cinética de secagem das castanhas, combinando altas temperaturas de secagem 120, 140, 160 e 180°C com velocidade de ar de secagem, 3m.s⁻¹, e ajustar os modelos de Fick, Page, Cavalcanti Mata e Henderson & Pabis aos dados experimentais; desenvolver um equipamento para despelicular a castanha, avaliando os parâmetros de índice de despeliculagem e minimizando o índice de quebra. Para isso, foram utilizados o método de secagem por meio do sistema conhecido como “*air fryer*”, metodologias específicas para medir as propriedades físicas das amêndoas, estudos preliminares de sistemas funcionais para o maquinário e testes com protótipos para o desenvolvimento do despeliculador, além de tratamentos estatísticos para comparar os dados obtidos com os experimentos realizados após o uso equipamento desenvolvido. Foi possível definir tempos e temperaturas de secagem ideais para a torra da amêndoa que não alteraram as propriedades físicas da castanha, além de desenvolver um equipamento eficiente, com cerca de 75% de amêndoas despeliculadas, com índice de amêndoas inteiras por volta de 90%, com uniformidade de cor para as temperaturas de 120 e 140°C, com coloração aceita para castanhas tipo exportação.

Palavras-chave: castanha de caju, amêndoa, *Anacardium occidentale* L, secagem, agroindústria, beneficiamento.

ABSTRACT

The removal of the cashew nut skin is largely responsible for the high rates of breakage of the almond and the frying stage has a direct influence on the color of the product. For these reasons, the biggest technological bottlenecks suffered by the nut processing industry are found in these two stages, although they are not the only ones responsible for the damages. The present work had as objective to develop new technological alternatives for the frying (drying / roasting) and dehulling stages of the cashew nuts and, to reach these objectives, it was necessary to study the variations in the physical characteristics of the almonds and after each stage of roasting and dehulling processing; study the drying kinetics of chestnuts, combining high drying temperatures 120, 140, 160 and 180 ° C with drying air speed, 3m.s⁻¹, and adjust the models of Fick, Page, Cavalcanti Mata and Henderson & Pabis experimental data; develop equipment to depelicularize the nut, evaluating the parameters of the depelication index and minimizing the breakage index. For this, the method of drying through the system known as "air fryer" was used, specific methodologies to measure the physical properties of the almonds, preliminary studies of functional systems for the machinery and tests with prototypes for the development of the depelicator, in addition to statistical treatments to compare the data obtained with the experiments carried out after using the developed equipment. It was possible to define ideal drying times and temperatures for the almond roasting that did not alter the physical properties of the nut, in addition to developing an efficient equipment, with about 75% of dehulled almonds, with a whole almond index of around 90%, with color uniformity for temperatures of 120 and 140 ° C, with accepted coloration for export-type nut.

Keywords: cashew nut, almond, *Anacardium occidentale* L, drying, agribusiness, processing

1. INTRODUÇÃO

A castanha de caju "*in natura*" é a matéria prima utilizada pela indústria de processamento, para obtenção da amêndoa de castanha de caju (ACC), e demais produtos como o líquido da casca da castanha (LCC), ambos destinados à exportação (PAIVA et al. 2006).

A produção de amêndoas inteiras destina-se tradicionalmente à exportação. As amêndoas fragmentadas, de preço bastante inferior, são vendidas principalmente no mercado interno, mas também no exterior, especialmente os pedaços maiores, que são destinados às indústrias fabricantes de sorvetes, bolos e chocolates. Desta forma, estabelece-se uma escala de valor comercial, com grande amplitude de valores, compreendida entre inteiras e pedaços, grânulos, xerém e farinha (CACEX, 2003).

A queima da amêndoa, amêndoa escura e irregular, apresentando pontos de queima, é muito comum no processamento em nível familiar, feitos por pequenos produtores, onde a castanha é incinerada, utilizando o próprio LCC como combustível de queima, depois é manualmente quebrada. Além da irregularidade de torra e quebra da amêndoa, essa tarefa é responsável por um número elevado de mutilação dos que trabalham nessa atividade, inclusive crianças. Proporcionar o crescimento do setor que envolve a indústria da castanha significa mais recursos disponíveis para aplicação no setor produtivo, que tem ficado sempre à mercê de políticas públicas, nem sempre satisfatórias e que raramente atuam no momento certo.

Considerando esses fatos e analisando todas as etapas do processamento da castanha de caju, verifica-se que muito pode ser feito no sentido de diminuir essas perdas, principalmente pelo estudo e otimização das etapas responsáveis por estes danos. Os danos devido aos efeitos de torra são maiores no beneficiamento em nível familiar e em pequenas fabriquetas não mecanizadas, assim além da quebra, se tem uma torra de má qualidade, o que diminui muito o valor do produto beneficiado.

Os processos de beneficiamento da castanha para a extração da amêndoa são complexos, sendo consideradas três modalidades: manual, mecanizado e semimecanizado. O processamento no modo mecanizado é importante por obter produtos mais seguros, menor necessidade de mão de obra

e menor possibilidade de contaminação pelo LCC, mas quebra da amêndoa é um dos fatores de desvalorização comercial, parâmetro considerado desvantagem no sistema mecanizado, apesar de não inviabilizar seu consumo (EMBRRAPA, 2016). Além desse fator, tem-se ainda a perda por torra inadequada, resultando algumas vezes em queima da amêndoa, ou torra escura e desuniforme, sendo este o principal fator de rejeição, a aparência.

Analisando todas as etapas do processamento da castanha de caju, a importância do agronegócio desse produto para a região e o apelo socioeconômico advindo desse mercado, verifica-se a importância de estudos e projetos que visam diminuir essas perdas, propondo novas técnicas de processamento para as etapas responsáveis pela maioria dos danos de produção, que são a torra e o despêliculamento.

Com isso, esse trabalho objetiva alterar o fluxograma de processamento de obtenção da amêndoa de castanha de caju, gerando novas alternativas para o processo. Para isso acontecer, objetivou-se estudar as características físicas da amêndoa, o processo de secagem em altas temperaturas e alta velocidade de ar, e o desenvolvimento de um equipamento para despêliculagem, além de avaliar a sua eficiência, para incorporação no novo processo.

1.1 Objetivo geral

Desenvolver novas alternativas tecnológicas para as etapas de torra e despeliculagem das amêndoas de castanha de caju, com vistas a obter melhor rendimento, minimizando quebras e produzindo amêndoas com cor clara e uniforme, de modo a aumentar a disponibilidade de produtos que atendam às exigências do mercado externo, sem aumento de produção.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as amêndoas cruas, quanto ao teor de água, tamanho, volume, massa, massa específica real e aparente, porosidade e textura (crocância);
- Realizar a secagem, ou torra “sem óleo”, combinando altas temperaturas 120, 140, 160 e 180 °C com alta velocidade do ar de secagem, 3 m.s⁻¹, e analisar a cinética de secagem, segundo ajustes dos modelos de Fick, Page, Cavalcanti Mata e Henderson & Pabis: determinar a energia de ativação, entalpia, entropia e energia livre de Gibbs;
- Caracterizar as amêndoas, após cada tratamento de torra, quanto ao teor de água, tamanho, massa, volume, massa específica real e aparente, porosidade, textura (crocância), índice de quebra, índice de amêndoas descascadas e cor.
- Desenvolver e validar um equipamento para remoção da película (pergaminho) da amêndoa de castanha do caju, usando o princípio de atrito entre escovas em movimentos de rotação;
- Realizar a despeliculagem de amêndoas torradas em 4 temperaturas, 120, 140, 160 e 180 °C, no equipamento desenvolvido, com ajuste de velocidade de rotação em 260 rpm e três períodos de permanência no despeliculador (30, 60 e 90 segundos) e analisar seus efeitos sobre a quebra e percentagem de amêndoas despeliculadas;

- Realizar a classificação do produto resultante de cada experimento (temperatura de secagem X parâmetros de ajuste do equipamento), conforme a FAO (2005), CACEX (2003), Ministério da Agricultura do Brasil (BRASIL, 2009) e parâmetros definidos pela AFI - Association of Food Industries, identificando as percentagens de amêndoas de cada classe, amêndoas inteiras, amêndoas totalmente despêculadas e sua coloração;
- Avaliar, por meio de análises estatísticas, os dados referentes a cada método de fritura e despêculamento e de interação entre estes, com objetivo de verificar a influência destas etapas sobre cada parâmetro de interesse, como cor, quebra e rendimento final de amêndoas inteiras e descascadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dados de produção da castanha de caju

A área mundial colhida de castanha de caju é de 5,97 milhões de hectares, com maior concentração na Costa do Marfim (28%) e na Índia (17%). Nos últimos dez anos (2008-2018), a área vem crescendo à uma taxa de 2% ao ano. E os principais responsáveis são a Tanzânia que teve um acréscimo anual de 11,2%, Costa do Marfim (6,8%), Benin (3,3%) e Índia (1,5%) (FAOSTAT, 2020).

O Nordeste responde por quase toda a produção brasileira de castanha de caju (98,6%), portanto, o que ocorre nessa Região reflete semelhantemente no País. Em 2018, a produção foi de 139 mil toneladas provenientes, principalmente, do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte, equivalente a 89,0% da produção nacional, com destaque para o Ceará que participou com mais da metade dessa quantidade (BRAINER & VIDAL, 2020).

Na Tabela 01 são apresentados os valores da produtividade da castanha de caju nos principais estados do Nordeste segundo IBGE.

Tabela 01 - Produtividade da castanha do caju nos principais estados do nordeste

<i>Estados</i>	<i>Produtividade (kg/ha)</i>										
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020*
<i>Piauí</i>	85	267	54	97	134	146	141	224	330	312	348
<i>Ceará</i>	98	278	96	131	135	139	82	260	304	325	274
<i>Rio Grande do Norte</i>	219	430	139	268	256	284	292	338	340	328	334

Fonte: IBGE (2020a, 2020b)

2.1.1 Consumo mundial de castanha de caju

O consumo mundial de caju foi de 647,3 mil toneladas em 2018, com projeção de crescimento anual de 5,7%, chegando a 956,6 mil toneladas em 2024. Um dos principais fatores para esse crescimento é a rápida mudança no padrão de consumo, nos últimos anos, devido, principalmente, aos variados

subprodutos de caju, que estão ocupando cada vez mais espaço no mercado de varejo, e ao seu uso em dietas diárias e lanches saudáveis prontos para o consumo. Além disso, na África, o aumento cada vez maior de compradores e processadores tem levado ao surgimento de unidades com grande capacidade de processamento (MORDOR INTELLIGENCE, 2020).

A Índia, apesar de grande produtora mundial, importa mais de 60% da castanha *in natura* para atender a demanda da indústria local e beneficia tanto para reexportação, quanto para atender ao seu consumo interno, que tem aumentado consideravelmente em função de uma tradição religiosa em parte de sua população. Entretanto, devido ao isolamento da pandemia, a colheita e o processamento foram adiados, afetando a indústria local. O consumo de castanha de caju reduziu, logo, o consumo mundial acompanha essa tendência, assim, com repercussões no mercado mundial, em 2020 (VINACAS, 2020).

2.2 Características gerais da castanha de caju

Segundo Araújo (2015), a amêndoa de castanha de caju participa de um mercado mundial bilionário, com movimentação superior a US\$ 2,4 bilhões por ano, além de empregar diretamente 1,2 milhão de pessoas, desde a mão de obra da produção até a exportação.

Além da diversidade de forma de consumo, com relação a composição nutricional, a amêndoa de castanha de caju é considerada fonte de proteína de alta qualidade, altamente energética, rica em gorduras e carboidratos. Apresenta elevados teores de cálcio, ferro e fósforo, bem como são fonte de compostos importantes, como manganês, cobre, arsênio e selênio que atuam como cofatores que regulam as funções fisiológicas e metabólicas do organismo (SOARES et al., 2012).

De acordo com a Figura 01, a castanha é um aquênio reniforme, de 3 a 5 cm de comprimento por 2,5 a 3,5 cm de largura, apresentando coloração castanho-escuro lustrosa, coriácea, liso, com mesocarpo espesso, alveolado, cheio de um líquido viscoso, acre e cáustico, denominado LCC (líquido da casca da castanha).

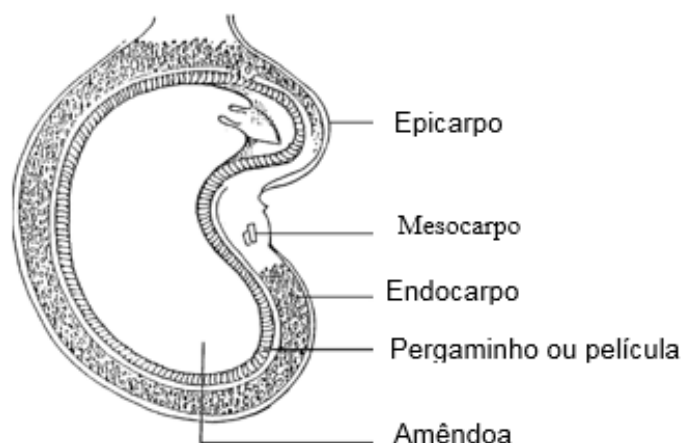


Figura 01 - Geometria da castanha de caju (adaptado de CAMARA, 2010)

Na Tabela 02 estão apresentadas as principais características físicas da castanha de caju.

Tabela 02 - Massa da castanha de caju e partes que a compõem.

	Massa Média	Variação
Castanha	8,15 g	3,42 a 13,61 g
Casca	5,71 g	2,71 a 10,69 g
Amêndoa	2,44 g	0,69 a 3,21 g

Fonte: Paula Pessoa et al. (2003)

Analisando os dados obtidos por Kross (2008), a amêndoa da castanha do caju tem um teor de proteína médio de 24,3%, extrato etéreo em torno 47,3% e apesar de todo esse teor lipídico é considerado um alimento muito saudável, visto que suas gorduras são compostas por ácidos graxos, predominantemente monoinsaturados, como o ácido oléico, que tem importante participação na redução do colesterol, além da presença de 9 dos 10 aminoácidos essenciais.

Segundo Paula Pessoa (2003), no beneficiamento da castanha de caju, o aproveitamento industrial ainda se concentra muito na produção da amêndoa inteira e salgada, ou a amêndoa partida, para atender aos segmentos de confeitaria e panificação. No entanto, ela pode ser consumida de diversas formas, com ou sem sal, in natura ou torrada, com cobertura de chocolate, caramelo, açúcar, mel ou outras. Também pode ser utilizada em produtos como

sorvetes, chocolates, bolos, doces e biscoitos, como farinha ou extrato hidrossolúvel de castanha (FREITAS & NAVES, 2010).

Na Tabela 03 encontram-se os valores da composição química da amêndoa da castanha de caju.

Tabela 03 - Composição química da amêndoa da castanha de caju *in natura*

Componente	Valor	
Teor de água (% b.u.)	2,0	– 9,0
Proteína bruta (N x 6,25) (%)	20,0	– 21,0
Sais minerais (%)	1,7	– 3,1
Fibra bruta (%)	1,2	
Extrato etéreo (%)	45,0	– 47,0
Carboidratos totais (%)	22,0	– 27,2
Cálcio ($\mu\text{g} / 100\text{g}^{-1}$)	165,0	– 550,0
Fósforo ($\mu\text{g} / 100\text{g}^{-1}$)	450,0	– 490,0
Ferro ($\mu\text{g} / 100\text{g}^{-1}$)	1,8	– 5,0
Tiamina ($\mu\text{g} / 100 \text{g}^{-1}$)	140,0	
Riboflavina ($\mu\text{g} / 100\text{g}^{-1}$)	150,0	
Ácido nicotínico ($\mu\text{mg} / 100\text{g}^{-1}$)	2200,0	

Fonte: PEIXOTO (2003)

2.2.1 Processamento para obtenção da amêndoa de castanha de caju

A extração da amêndoa é uma operação complexa, pois a casca, em razão de sua estrutura, é resistente ao corte e a ruptura. Além disso, o LCC pode se incorporar e inutilizar a amêndoa para o consumo (PAULA PESSOA et al., 2003; KROSS, 2008).

O processamento da castanha de caju consiste em cinco operações; a primeira operação seria tornar as cascas susceptíveis ao corte, seguindo-se o corte, a despeliculagem, a seleção e a embalagem.

Estes métodos utilizados para o processamento da castanha de caju podem ser reunidos em três grupos: manual, semi-mecanizado e mecanizado. O sistema mecanizado apresenta diversas vantagens sobre o manual: menor

necessidade de mão-de-obra, obtenção de produtos mais higiênicos, melhor qualidade das amêndoas em relação à cor, menor probabilidade de contaminação da amêndoa pelo LCC. Por outro lado, o sistema manual apresenta menor índice de quebra, o que é de grande importância para a indústria, já que as amêndoas inteiras possuem valor superior no mercado (EMBRRAPA, 2016). Desta forma, o grande desafio da mecanização é que o beneficiamento da castanha de caju possibilite a obtenção de um percentual máximo de amêndoas inteiras.

A quebra das amêndoas é um importante parâmetro industrial porque, além de aumentar os custos de produção, interfere na receita da comercialização, mediante redução do preço do produto.

Segundo estudos citados por Paula Pessoa et al. (2003), o índice de amêndoas inteiras no sistema mecanizado é de 55 a 60% para máquinas bem reguladas, enquanto que no sistema manual esse índice está em torno de 75%. Paiva et al. (2000) relatam que o índice de quebra das amêndoas também está relacionado ao sistema de beneficiamento utilizado, se mecanizado (40%–45%) ou semimecanizado (20% – 25%), ou seja, o índice de inteiras citado encontra-se na faixa dos números citados por Paula Pessoa et al. (2003).

Analisando os dados bibliográficos coletados para esta pesquisa, percebe-se que existem muitas informações desconhecidas quanto ao índice de quebra em cada etapa do processamento, porém existe o consenso, entre os autores consultados, de que o índice de quebra final, em toda a cadeia é muito alto, maior que 50% e as etapas que mais contribuem para este alto índice são a torra (ou fritura, quando realizada com óleo) e a despêliculagem.

2.3 Classificação da amêndoa de castanha de caju

O sistema de classificação para amêndoas processadas, estabelecido pela FAO (2005), CACEX (2003) e o Ministério da Agricultura do Brasil (BRASIL, 2009) compreende as seguintes classes (Figura 02,03 e 04):

Existe 22 tipos de castanha de caju conforme especificações internacionais estabelecidas pela AFI - Association of Food Industries.

Definições:

1ª Qualidade - tem uma cor uniforme que pode ser branca, amarelo-claro, marfim pálido ou cinza-claro.

2ª Qualidade - queimada/variação de cor podem ter a cor amarela, marrom-claro, marfim-claro, cinza-claro ou marfim forte.

3ª Qualidade - queimada especial/variação de cor - pode ser de cor amarelo-forte, marrom, âmbar, e azul claro a escuro. Elas podem ser ligeiramente murchas, imaturas, pintadas, manchadas ou descoradas.

4ª Qualidade - se qualificam como de primeira ou segunda qualidade, exceto pelo fato de terem pontos brocados.

AMÊNDOAS INTEIRAS

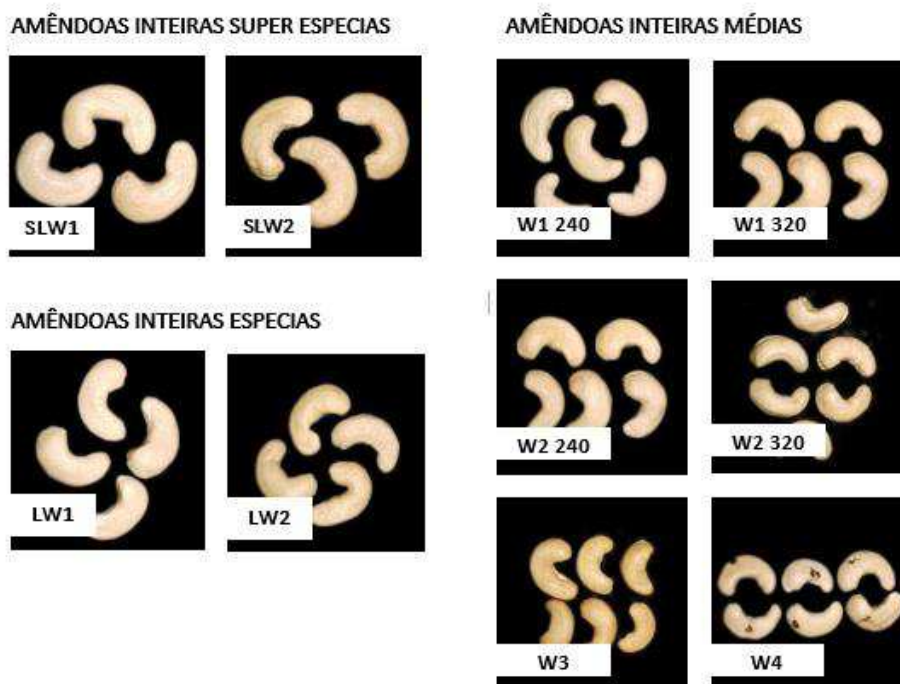


Figura 02 - Classificação de amêndoas de castanha de caju inteiras – conforme o FAO (2015), CACEX (2003) e o Ministério da Agricultura do Brasil (BRASIL, 2009).

Amêndoas inteiras super especiais - Uma amêndoa é classificada como inteira quando ela tem a forma característica de uma amêndoa de castanha de caju e no máximo 1/8 da castanha tenha se separado. Este tipo pode ser designado como “W”.

SLW1 - Inteira Super Especial de 1ª Qualidade (140-180 amêndoas por libra-peso)

SLW2 - Inteira Super Especial de 2ª Qualidade (140-180 amêndoas por libra-peso)

Amêndoas inteiras especiais

LW1 - Inteira Especial de 1ª Qualidade (180-210 amêndoas por libra-peso)

LW2 - Inteira Especial de 2ª Qualidade (180-210 amêndoas por libra-peso)

Amêndoas inteiras médias

W1-240 - Inteira de 1ª (220-240 amêndoas por libra-peso)

W1-320 - Inteira de 1ª (300-320 amêndoas por libra-peso)

W2-240 - Inteira de 2ª (220-240 amêndoas por libra-peso)

W2-320 - Inteira de 2ª (300-320 amêndoas por libra-peso)

W3 - Inteira de 3ª com variação de cor (sem controle de contagem)

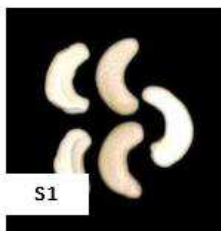
W4 - Inteiras com pontos escuros (sem controle de contagem)

AMÊNDOAS QUEBRADAS:

BATOQUES



BANDAS



PEDAÇOS



Figura 03 - Classificação de amêndoas de castanha de caju quebradas conforme a FAO (2015), CACEX (2003) e o Ministério da Agricultura do Brasil (BRASIL, 2009).

Batoques - Amêndoas que foram quebradas transversalmente, tem menos de 7/8 mas no mínimo 3/8 de uma amêndoa inteira e os cotilédones ainda estão naturalmente presos. Este tipo pode também ser designado como “B”.

B1 - Batoques de 1ª Qualidade

B2 - Batoques de 2ª Qualidade

B3 - Batoques de 3ª Qualidade

Bandas- Metade da castanha partida longitudinalmente, no máximo 1/8 deste cotilédone tenha se separado. Este tipo pode também ser designado como “S”

S1 - Bandas de 1ª Qualidade

S2 - Bandas de 2ª Qualidade

S3 - Bandas de 3ª Qualidade

Pedaços - Pedacos grandes passando pela peneira Tyler N°. 22” (USA 5/16) abertura = 8.0mm e retidos na peneira Tyler No. 4 (USA No. 4) abertura = 4.75mm

P1 - Pedacos Grandes de 1ª Qualidade

P2 - Pedacos Grandes de 2ª Qualidade

P3 - Pedacos Grades de 3ª Qualidade com variação de cor

AMÊNDOAS GRANULADAS

PEDAÇOS PEQUENOS



PEDAÇOS PEQUENOS ESPECIAIS



GRÃOS GRANULOS



GRÃOS FINOS



Figura 04 - Classificação de amêndoas de castanha de caju granuladas conforme a FAO (2015), CACEX (2003) e o Ministério da Agricultura do Brasil (BRASIL, 2009).

Pedaços pequenos - Pedacos pequenos que passam pela peneira Tyler N°. 3,5 (USA N°. 3,5) abertura = 5,66mm e ficam retidos na peneira Tyler N°. 5 (USA N°. 5) abertura = 4,00 mm no mínimo 70%.

SP1 - Pedacos Pequenos de 1ª Qualidade

SP2 - Pedacos Pequenos de 2ª Qualidade

SP3 - Pedacos Pequenos de 3ª Qualidade com variaçao de cor

Pedaços pequenos especiais - Fragmentos ou pedacos que passam pela peneira Tyler N°. 4 (USA N°. 4) abertura = 4,75 mm e ficam retidos na peneira Tyler N°. 7 (USA N°. 7) abertura = 2.83 mm no mínimo 70%.

SSP1 - Pedacos Pequenos Especiais de 1ª Qualidade

SSP2 - Pedacos Pequenos Especiais de 2ª Qualidade

SSP3 - Pedacos Pequenos Especiais de 3ª Qualidade

Grãos, grânulos - Pedacos pequenos que passam pela peneira Tyler N°. 7 (USA No. 7) abertura = 2.83 mm e ficam retidos na peneira Tyler N°. 10 (USA No. 12) abertura = 1.70 mm no mínimo 70%.

G1 - Grânulos/Baby Bits 1ª Qualidade

G2 - Grânulos/Baby Bits 2ª Qualidade

G3 - Grânulos/Baby Bits 3ª Qualidade

Grãos finos - Pedacos pequenos que passam pela peneira Tyler N°. 8 (USA No. 8) abertura = 2,38 mm e ficam retidos na peneira Tyler N°. 14 (USA No. 16) abertura = 1.16 mm no mínimo 70%.

X1 - Xerém de 1ª Qualidade

X2 - Xerém de 2ª Qualidade

Farinha - Farinha de castanha de caju que passa pela peneira Tyler N°. 14 (USA N°. 16) abertura = 1,16 mm

2.4 Processo de beneficiamento de castanha de caju

Na Figura 05 encontra-se o fluxograma das etapas de processamento da amêndoa de castanha de caju, como normalmente ocorre nas indústrias de beneficiamento do produto (PAIVA et al., 2006).

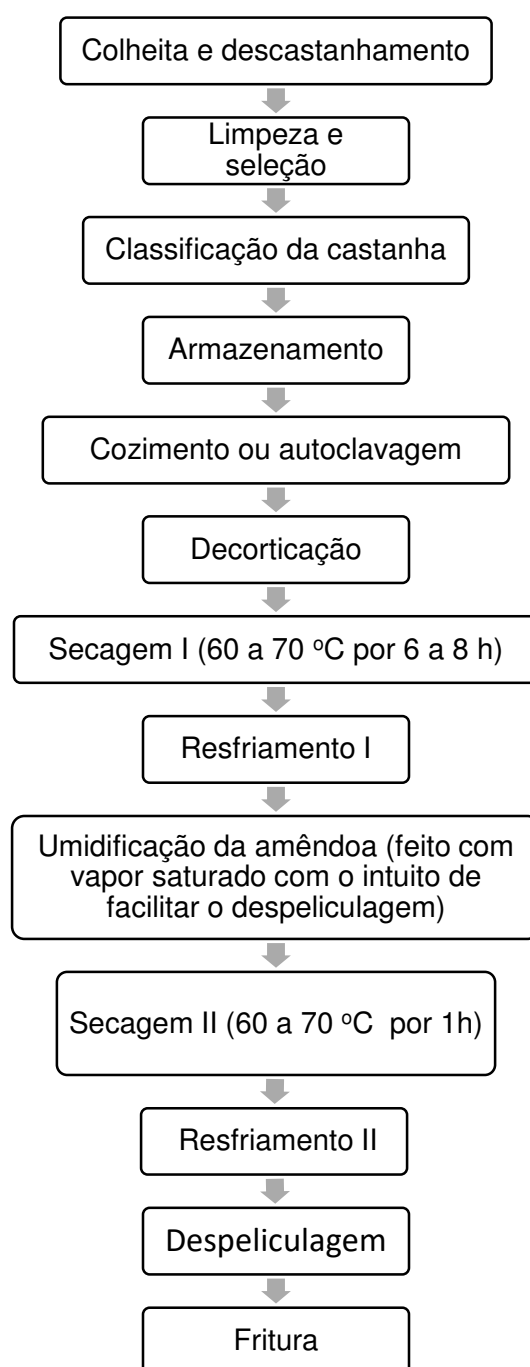


Figura 05 - Fluxograma das etapas de processamento de castanha de caju, praticado nas indústrias de beneficiamento de castanha de caju (PAIVA et al., 2006).

Descrição dos procedimentos das etapas contidas no fluxograma da Figura 05:

1. **Colheita e descastanhamento:** após a colheita manual, é feito o descastanhamento, que consiste na separação da castanha do pedúnculo (caju), também feita manualmente.
2. **Limpeza e seleção:** a limpeza é feita em água corrente e, em seguida, com hipoclorito, como recomendado para frutos. A seleção consiste na eliminação de castanhas defeituosas, chochas e danificadas;
3. **Classificação** (peneira selecionadora): consiste em selecionar as castanhas nos tamanhos: pequenas, médias e gigantes;
4. **Armazenamento:** o armazenamento é feito em sacaria que, devidamente empilhadas, permanecem no armazém até o processamento para obtenção da amêndoa;
5. **Autoclavagem** (gerador de vapor/cozedor): consiste no cozimento da castanha em vapor úmido de autoclave ou de caldeira, por 20 a 30 minutos, visando facilitar o corte. Ao final da umidificação, o teor de água deve variar de 13% a 16%, na casca, e de 8% a 9%, na amêndoa;
6. **Decorticação:** corte ou abertura da castanha, consiste na separação entre a amêndoa e a casca, podendo ser feita pelos métodos manual, semimecanizado ou mecanizado;
7. **Secagem I:** redução do teor de água da amêndoa em estufa, da amêndoa: a amêndoa obtida na decorticação apresenta teores de água entre 6% e 8%, o que torna difícil a remoção da película que a envolve. A secagem torna essa película mais quebradiça e mais fácil de ser removida. A redução da umidade nesta etapa não deve ultrapassar o limite de 3%, para manter a integridade estrutural da amêndoa. Para esse efeito, a operação é realizada em estufas com circulação de ar quente (60°C a 70°C), por 6 a 8 horas;
8. **Resfriamento I (em bandejas):** local de descanso das amêndoas para seu esfriamento, após a secagem I;
9. **Umidificação da amêndoa** (gerador vapor/câmara de umidificação): vapor saturado, com objetivo de facilitar o desprendimento da película;
10. **Secagem II:** após a umidificação, a amêndoa retorna para a estufa. Novamente a operação é realizada em estufas com circulação de ar quente

(60°C a 70°C), por 1 hora. As castanhas são colocadas em bandejas teladas e devem ser aquecidas, para que a película se solte por igual;

11. **Resfriamento:** O resfriamento da amêndoa deve ser feito nos próprios suportes das bandejas da estufa ou em suportes apropriados, por cerca de 2 horas, até alcançar a temperatura ambiente. Longo tempo de resfriamento pode provocar a reumidificação da amêndoa e a perda de qualidade, dificultando a retirada da película;
12. **Despeliculagem** (em despeliculador): A despeliculagem consiste na remoção da película que envolve a amêndoa, sendo essa operação executada manualmente, para as amêndoas de maior tamanho (tipos 2, 3 e 4) e mecanicamente, para as amêndoas quebradas e inteiras do tipo 1. A maior quebra de amêndoas ocorre durante a despeliculagem, quando são mais frágeis e quebradiças por causa do alto teor de umidade. Nessa etapa, a quebra pode chegar a 25%. Para o processo mecânico, essa operação pode ser feita em cilindro rotativo, acionado por motor elétrico de baixa rotação, em que as amêndoas são submetidas ao atrito com tela perfurada, provocando a liberação parcial da película. Tanto no método semimecânico como no mecânico, pode-se obter até 70% de amêndoas totalmente sem película, sendo o restante submetido à raspagem manual, com facas de despeliculagem;
13. **Fritura:** para realizar este processo, utiliza-se óleo vegetal, de preferência milho ou soja, e as amêndoas devem estar selecionadas por tamanho, a fim de permitir uma fritura uniforme. Após a fritura, realiza-se a centrifugação para retirar o excesso de óleo, deixando-as com aspecto enxuto. Esta etapa também contribui para um acentuado índice de quebra. No modo manual, existe também perda por queima ou desvalorização por torra escura e irregular. O ajuste e o controle da temperatura (150°C a 170°C) é muito importante para que a operação seja bem executada. O óleo deve ser de boa qualidade, para não conferir sabor estranho à amêndoa. E o tempo de fritura varia entre 3 a 6 minutos.

2.5 Propriedades físicas

2.5.1 Teor de água

A determinação do teor de água consiste em conhecer o percentual de água que o produto biológico possui, nesse caso a castanha, e que é necessária uma vez que as características de consumo, a qualidade do produto e a secagem possuem uma relação direta com o conteúdo de água (DUARTE et al., 2006).

2.5.2 Tamanho e massa

O tamanho da castanha é definido pela tomada das medidas a, b e c, relacionadas, respectivamente, às maiores dimensões dos produtos em direções mutualmente perpendiculares, sendo a, maior dimensão; b, largura e c, espessura; enquanto a massa consiste no resultado da pesagem do produto feita em balança de precisão adequada (DUARTE et al., 2006).

2.5.3 Massa específica e porosidade

A massa específica é obtida pela relação entre a massa e o volume da amêndoa, onde o volume é obtido por deslocamento de fluido e a porosidade é obtida utilizando-se um picnômetro de comparação a ar (MOHSENIN, 1980).

2.5.4 Volume

O volume da amêndoa de castanha de caju pode ser calculado por semelhança geométrica ou diretamente pelo método de deslocamento de fluido (DUARTE et al., 2006).

2.5.5 Parâmetros de crocância

O parâmetro de crocância está relacionado à textura de um alimento e pode ser definida como o conjunto de características físicas, formadas a partir dos elementos estruturais do alimento, sendo perceptíveis pelo tato e relacionadas à deformação, desintegração e fluxo do alimento, sob a aplicação de uma força (BOURNE, 2004).

A textura manifesta-se quando o alimento sofre uma deformação (quando é mordido, prensado, cortado, e demais aplicações de esforços.). É por meio

dessa interferência na sua integridade que se pode ter noção da resistência, coesividade, fibrosidade, granulosidade, aspereza, crocância, entre outras características (TEIXEIRA, 2009).

A análise de textura pode assumir uma grande importância na indústria de alimentos, no controle do processo de fabricação, matérias primas, produto final e pesquisa de desenvolvimento de novos produtos (CARNEIRO et al., 2011).

Dentre os instrumentos de medição de força disponíveis, o mais utilizado é o analisador de textura TAXT2, que mede a força e as propriedades de textura de produtos alimentícios, através da deformação dos mesmos, de várias maneiras e da medição da força necessária para provocar a deformação (SHARMA et al., 2000).

Os parâmetros de textura são atributos importantes percebidos pelos consumidores. Muitos métodos instrumentais têm sido desenvolvidos para determinação das propriedades de textura de alimentos (BOURNE, 2002), sendo o mais comumente utilizado o método de análise do perfil de textura (TPA) (HERRERO et al., 2007).

A análise do perfil de textura (TPA) é um teste que simula a ação de compressão e corte dos dentes durante a mastigação, consistindo em aplicações sucessivas de forças (deformantes) ao corpo de prova, e a partir disso é possível gerar uma curva força x tempo, onde são extraídos os parâmetros textuais (BOURNE, 2002).

A resistência detectada pelo aparelho é registrada na forma de uma curva típica de força-deformação do alimento e resulta em um gráfico de força/tempo, característico para cada tipo de produto, permitindo avaliar parâmetros, como a adesividade (A3), a coesividade (A2/A1), elasticidade (T2/T1) e a firmeza (H) (Figura 06).

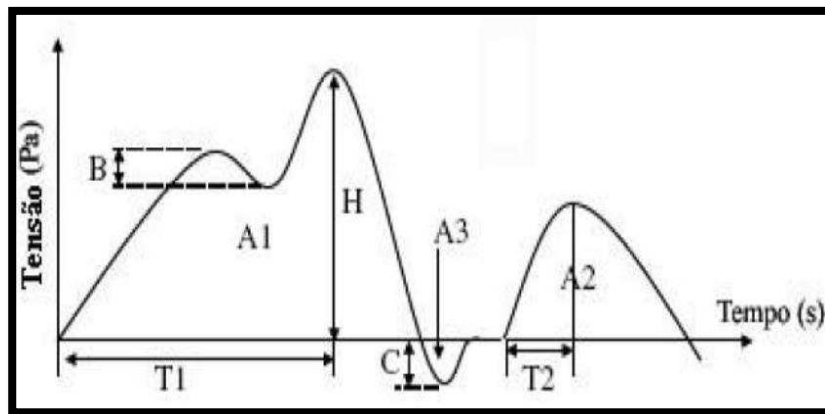


Figura 06 - Curva típica de uma análise instrumental do perfil de textura (TPA)

2.5.6 Análise de cor

A cor é considerada um fator importante para aceitação do produto no mercado interno e externo. Além da aceitação ela também é utilizada como parâmetro na indústria para indicar o nível desejado de torrefação e até a degradação durante a estocagem, sendo as castanhas mais claras as mais aceitas no momento da comercialização (LEDBETTER; PALMQUIST, 2006; YAN et al., 2012).

2.6 Secagem

A secagem é o processo que consiste em remover a água dos produtos por evaporação até um nível que preserve, durante o armazenamento, a qualidade fisiológica do produto ou sua aparência e qualidade nutritiva para alimentação humana e/ou animal. A cinética de secagem consiste no estudo da velocidade com que o produto biológico perde água durante o processo de secagem.

Os métodos de cálculos de cinética de secagem são aplicados de modos diferentes, dependendo do período de secagem considerado. No período de taxa de secagem constante, as transferências de calor e de massa na interface ar-produto governam a secagem e fixam a velocidade de secagem, enquanto que no segundo período, as transferências internas são limitantes (PARK et al., 2007).

Segundo Park et al. (2007), o processo de secagem, baseado na transferência de calor e de massa, pode ser dividido em três períodos conforme apresentado na Figura 07.

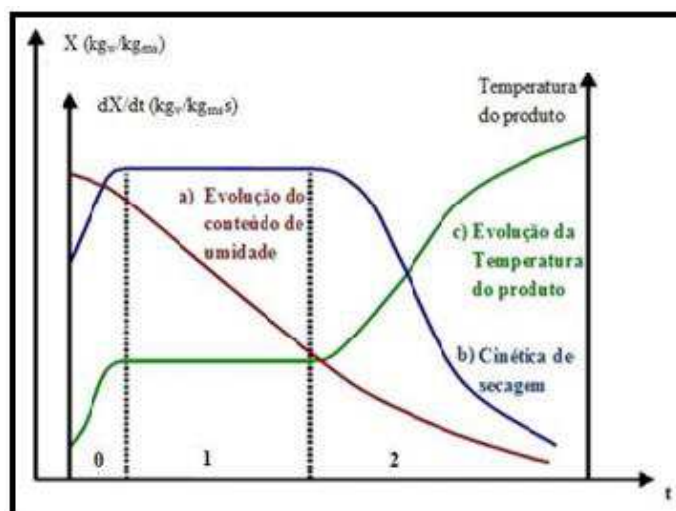


Figura 07 - Curvas de secagem: evolução do teor de água do produto (X), de sua temperatura (T) e da velocidade de secagem (dX/dt). **Fonte:** PARK et al. (2007).

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem, isto é, a curva obtida pesando o produto durante a secagem numa determinada condição de secagem.

A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto (variação do conteúdo de água do produto por tempo, dX/dt em relação à evolução do tempo t), isto é, a curva obtida diferenciando a curva (a).

A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto (T) em relação à evolução do tempo t), ou seja, é a curva obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem.

De acordo com o comportamento da transferência de calor e massa ao longo da operação, a secagem pode ser dividida em três períodos: período de indução, período em taxa constante e período em taxa decrescente de secagem.

O período de indução (0) representa o início da secagem. Nesse período ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor

de água. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (água) (PARK et al., 2007).

O segundo período (1) caracteriza-se pela taxa constante de secagem. A água evaporada é a água livre. A transferência de massa e de calor é equivalente e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Enquanto houver quantidade de água na superfície do produto, suficiente para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante (PARK et al., 2007).

De acordo com Almeida et al. (2006), a taxa constante de secagem pode ser observada nos produtos nos quais a resistência interna ao transporte de água é muito menor que a resistência externa à remoção na superfície do produto para o ambiente. Durante esta fase, a superfície sólida atinge rapidamente a temperatura de bulbo molhado do ar e, permanece constante com esse valor, enquanto existir a película de água na superfície.

No terceiro período, a taxa de secagem é decrescente. A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa; o fator limitante nessa fase é a redução da migração de água do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo é encerrado. O terceiro período é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios (PARK et al., 2007).

O período de secagem em taxa decrescente é, às vezes, dividido em dois ou três outros períodos; entretanto, para os produtos agrícolas e alimentar, é difícil indicar com clareza as divisões nas curvas experimentais de secagem (CASTRO, 2015).

Quando a umidade de equilíbrio é alcançada, ou seja, quando a pressão parcial do vapor na superfície do material é igual à pressão do vapor na fase gasosa, a secagem não ocorre mais, sendo, portanto, a taxa de secagem nula.

É importante considerar que, dependendo das condições de processo, a secagem pode afetar prejudicialmente a estrutura do alimento, causando alteração na cor, como as reações de escurecimento enzimático e não

enzimático (SILVA et al., 2005; LISBÔA et al., 2012), além da perda de nutrientes devido à exposição do produto a altas temperaturas por um longo tempo.

2.6.1 Modelos matemáticos de secagem em camada fina

Os modelos matemáticos para secagem de produto em camada fina podem ser classificados em três grupos: teóricos, semiteóricos e empíricos. Os modelos teóricos consideram o mecanismo de transporte de massa e calor no interior do grão e consiste em sistemas de equações diferenciais que relacionam o teor de água e temperatura do produto biológico. Os modelos empíricos são resultados de ajustes de curvas de dados obtidos experimentalmente.

Para descrever o processo de secagem de produtos, os modelos mais completos consideram um sistema de equações de transporte de calor e massa. Este sistema, na forma mais generalizada, foi apresentado por Luikov e Mikhailov em 1965. Para produtos capilares porosos como as sementes, considerando que não há encolhimento do produto e que o fluxo de líquido ocorre devido à diferença de pressão total, o sistema foi apresentado por Luikov em 1966, na forma de equações diferenciais parciais:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla^2(K_{11} X) + \nabla^2(K_{12} \theta) + \nabla^2(K_{13} P) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2(K_{21} X) + \nabla^2(K_{22} \theta) + \nabla^2(K_{23} P) \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2(K_{31} X) + \nabla^2(K_{32} \theta) + \nabla^2(K_{33} P) \quad (3)$$

Onde o potencial X representa o teor de água, θ é o potencial de transferência de calor (temperatura) e P é o potencial de filtração (pressão). K_{ij} , para $i = j$, representam os coeficientes fenomenológicos e K_{ij} para $i \neq j$ representam os coeficientes de combinação. Porém, na análise prática de secagem de sementes, são desconsiderados o efeito dos gradientes de pressão total e os gradientes de temperaturas, tendo em vista serem poucos significativos. Logo, o modelo de Luikov aplicado à secagem de grãos se reduz a um sistema de duas equações diferenciais parciais.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla^2 D_{ef} X \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2 D_{\theta} \theta \quad (5)$$

Onde X é o teor de água, θ a temperatura do grão e D_{ef} e D_{θ} os coeficientes de difusividade efetiva de massa e calor, respectivamente.

A influência da temperatura no coeficiente de difusividade efetiva pode ser avaliada utilizando a equação de Arrhenius, descrita na Equação (6).

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (6)$$

em que,

$D_0 \rightarrow$ coeficiente de difusão limite, $m^2 \cdot s^{-1}$;

$E \rightarrow$ energia de ativação, (Kj/ mol);

$R \rightarrow$ constante universal dos gases, $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$;

$T \rightarrow$ temperatura absoluta, K.

Os coeficientes da expressão de Arrhenius podem ser obtidos linearizando a Equação (6) com a aplicação do logaritmo neperiano da seguinte forma:

$$\ln D_{ef} = \ln D_0 - \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (7)$$

Para a difusividade efetiva da massa constante no interior do produto, a primeira equação do sistema de Luikov será escrita como equação linear na forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (8)$$

Em que c é igual a 0, para corpos planos, 1 para corpos cilíndricos, 2 para corpos esféricos e r , distância radial ou espessura, m.

Para um produto com forma aproximada a um cilindro de raio R_e , considerando a distribuição de água inicialmente uniforme e ausência de resistência térmica, a solução analítica da Equação (8) é expressa por:

$$RX = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp\left(-\frac{\lambda_n^2}{R_e^2} D_{ef} t\right) \quad (9)$$

em que,

RX → razão de teor de água, adimensional,

n → número de termos,

R_e → Raio equivalente,

λ_n → raízes da equação de Bessel de primeiro tipo e com ordem 0, algumas destas raízes são apresentadas na Tabela 04.

Tabela 04 - Primeiras seis raízes da função de Bessel de primeiro tipo e de ordem zero (SOUSA, 2017)

n	λ_n
1	2,4048
2	5,5201
3	8,6537
4	11,7915
5	14,9309
6	18,0711

A razão do teor de água é obtida por uma relação das variáveis de teor de água inicial, de equilíbrio e teor de água no decorrer do tempo, conforme equação 10.

$$RX(t) = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (10)$$

em que,

$RX(t)$ → Razão de teor de água, adimensional.

X → Teor de água no tempo, (b.u.)

X_e → Teor de água de equilíbrio, (b.u.)

X_i → Teor de água inicial, (b.u.)

O raio equivalente da esfera (R_e) é determinado pela Equação (11) do volume do cilindro circular reto, pois neste estudo será aplicada a equação de Fick para a forma cilíndrica, já muito bem definida. Apesar de seu formato curvo, a semelhança com um cilindro é bem perceptível, podendo ser considerada a união de três cilindros em diferentes direções, conforme Figura 08.

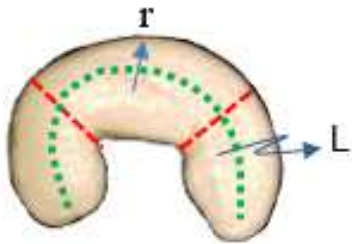


Figura 08 - Desenho esquemático da castanha de caju, mostrando a semelhança com cilindro.

Onde, V é o Volume da amêndoa de castanha de caju.

$$V = \frac{4}{3} \pi r_1 r_2 L \quad (11)$$

em que:

r_1 → Referente ao eixo ortogonal

r_2 → Referente ao eixo ortogonal

L → Comprimento da amêndoa de castanha do caju, considerando a curvatura.

As constantes de secagem para os modelos semiteóricos que serão analisadas adiante se obtêm a partir do desenvolvimento da equação analítica da Lei de Fick.

$$k = \frac{\lambda^2 D_{ef}}{R_e^2} \quad (12)$$

Os modelos semiteóricos são os que se baseiam na Lei de resfriamento de Newton, aplicada para transferência de massa e secagem isotérmica.

Lewis, citado por Brooker et al. (1992), sugeriu que durante o processo de secagem de materiais higroscópicos porosos no período de taxa constante decrescente, a perda de água seja proporcional à diferença entre o teor de água do material e o seu teor de água de equilíbrio, ou seja:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -k (X - X_e) \quad (13)$$

Considerando k a constante de secagem e integrando a Equação (13) para intervalo de tempo 0 a t , e para teores de água decrescente (X), a partir do teor de água inicial (X_i), obtém-se:

$$\frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \exp(-k t) \quad (14)$$

Os pesquisadores preferiram adotar os métodos empíricos em virtude da complexidade matemática e da falta de dados confiáveis sobre condutividade térmica e a difusividade de massa. Os modelos empíricos negligenciam os fundamentos termodinâmicos dos processos de secagem, o que permite considerar o teor de água e a temperatura constante para todo o grão. Procuram relacionar o teor de água e o tempo de secagem com os dados obtidos experimentalmente.

Page (1949) com base na Equação (14) propôs um modelo empírico para descrever a secagem dos grãos e introduziu um termo potencial (n) de correção do tempo, na seguinte forma:

$$RX = \exp(-k t^n) \quad (15)$$

Cavalcanti Mata (2005 e 2006), com base na equação de Page propôs duas equações para descrever o processo de secagem, o pesquisador relata, de maneira geral, que as curvas de secagem em camada fina não apresentam uma só curvatura. As Equações (18) e (19) permitem um melhor ajuste da curva de secagem aos dados obtidos experimentalmente.

$$RX = a \exp(-k_1 t^{n_1}) + b \exp(-k_1 t^{n_2}) + c \quad (18)$$

$$RX = a \exp(-k_1 t^{n_1}) + b \exp(-k_2 t^{n_2}) + c \quad (19)$$

em que,

RX – Razão de teor de água (adimensional)

k1 – Constante de secagem

t – Tempo (segundos)

a, b, n¹, n², c → constantes do modelo (adimensional)

De acordo com Cavalcanti Mata et al. (2006) este modelo considera a camada espessa como sendo construída de várias camadas finas sobrepostas uma sobre as outras.

Henderson & Pabis (1961) propuseram a seguinte equação para secagem de milho:

$$RX = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t) \quad (17)$$

em que,

RX → Razão do teor de água (adimensional)

k₁,k₂ → Constante de secagem

t → Tempo

2.6.2 Entalpia, entropia e energia livre de Gibbs

Com a finalidade de ajustar processos de secagem e até projetar equipamentos, faz-se necessário conhecer o comportamento termodinâmico nos processos de secagem de produtos agrícolas. Para isso, deve-se calcular a energia requerida neste processo, estudar as propriedades da água absorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos e o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos produtos agrícolas (CORRÊA et al., 2010).

Mudanças de entalpia fornecem uma medida da variação de energia que ocorre na interação das moléculas de água com os constituintes do produto durante os processos de sorção. A entropia pode estar associada com a ligação ou repulsão das moléculas de água dos componentes do alimento no sistema e está associada com o arranjo espacial da relação água-produto. Assim, de acordo com Oliveira et al. (2008), a entropia caracteriza, ou define, o grau de ordem ou desordem existente no sistema água-produto.

A energia livre de Gibbs é um indicativo da afinidade do produto pela água, fornecendo um critério de avaliação da dessorção da água. Para valores de energia livre de Gibbs negativos, o processo é espontâneo, enquanto para valores positivos é não-espontâneo (TELIS et al., 2005). Mudanças na energia livre de Gibbs durante a troca de água entre o produto e o meio são a energia requerida para transferir moléculas de água do estado de vapor para uma superfície sólida ou vice-versa. Essa é a quantidade que pode ser considerada como uma medida do trabalho feito pelo sistema para realizar o processo de dessorção ou o de adsorção. O equilíbrio será alcançado quando o gradiente de energia livre de Gibbs for zero (NAYAK & PANDEY, 2000).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida nos laboratórios do curso de Engenharia de Alimentos, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus de Campina Grande.

3.1 Matéria prima

Foram utilizadas amêndoas de castanha de caju cruas e com película, visto que nesta pesquisa foram propostas alterações nas etapas posteriores à decorticação efetuada nas indústrias de beneficiamento. As amêndoas, como descritas, foram adquiridas de uma cooperativa localizada na cidade de Fortaleza – CE, associada ao Sindicaju, já nas condições padrões para a realização da pesquisa.

3.2 Seleção

A primeira caracterização e seleção, para aquisição da matéria-prima, foi realizada ainda na indústria de beneficiamento, e consistiu na escolha de amêndoas recém descortizadas, cruas e com pele, apresentando bom aspecto físico (aparência) e íntegras. Foram escolhidas amêndoas com tamanho médio entre 22 a 32mm de comprimento, classificadas, de acordo com a CACEX (2003), como amêndoas do tipo SLW2 e LW1 respectivamente Inteira super especial de 2ª qualidade e inteira especial 1ª qualidade.

3.3 Caracterização das amêndoas de castanha de caju

Apesar de as amostras passarem por classificação prévia na indústria, foi realizada uma nova seleção manual, por medição e pesagem das amêndoas, com o intuito de trabalhar com amostras mais uniformes possíveis, para melhor controle do processo.

3.3.1 Teor de água

A determinação do teor de água foi feita pelo método gravimétrico de volatilização, usando-se estufa a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ até peso constante (IAL, 2008). Para

as amêndoas de castanha de caju, foi observado que o peso delas não ficavam estabilizados com 24h, conforme o método sugere, então as medições foram realizadas até as amêndoas atingirem o equilíbrio, que resultou em 36 horas submetidas a estufa.

3.3.2 Tamanho e massa

Foram feitas medidas do comprimento, largura e espessura, utilizando-se um paquímetro com precisão de 0,01mm; a massa foi obtida por pesagem em balança analítica (DUARTE et al., 2006).

3.3.3 Volume

Para o cálculo de volume, por deslocamento de fluido, foi utilizado uma balança de semi-analítica um *becker* com água, uma seringa, uma régua e óleo vegetal (de soja). Pesou-se um Becker contendo água, em quantidade suficiente para cobrir a amêndoa de castanha, consistindo na primeira pesagem. Depois a amêndoa, impermeabilizada por uma fina camada de óleo, foi forçada para dentro do Becker contendo água, que se encontrava no prato da balança, de forma a ficar totalmente mergulhado, porém sem tocar o Becker em nenhum ponto, assim foi anotada a segunda pesagem. A diferença entre a segunda pesagem e a primeira foi dividida pela massa específica da água, resultando no volume requerido da amêndoa.

3.3.4 Massa específica real, aparente e porosidade

A massa específica foi obtida pela relação entre a massa e o volume da amêndoa, onde o volume foi obtido por deslocamento de fluido e a porosidade foi determinada utilizando-se um picnômetro de comparação a ar (MOHSENIN, 1980).

3.3.5 Área superficial

A área superficial da castanha de caju foi obtida por sua semelhança geométrica com um cilindro circular reto.

3.3.6 Parâmetros de crocância

A determinação de crocância foi realizada empregando-se um texturômetro TAXT plus (Stable Micro Systems). Os valores obtidos foram relativos à resistência à compressão (esmagamento). O probe cilíndrico de 10mm tipo P/2 foi ajustado para cortar a amostra, com distância de retorno de 5 mm e velocidade de retorno de 1 mm.s^{-1} . As medições do teste foram realizadas no centro de cada amostra, em que foi observada a força máxima de corte..

O experimento foi realizado com uma unidade de castanha como amostra para cada ensaio, e foram realizadas 5 repetições.

3.3.7 Processamento proposto para beneficiamento da amêndoa de castanha de caju

Para esta pesquisa foram propostos os procedimentos descritos no fluxograma da Figura 09.

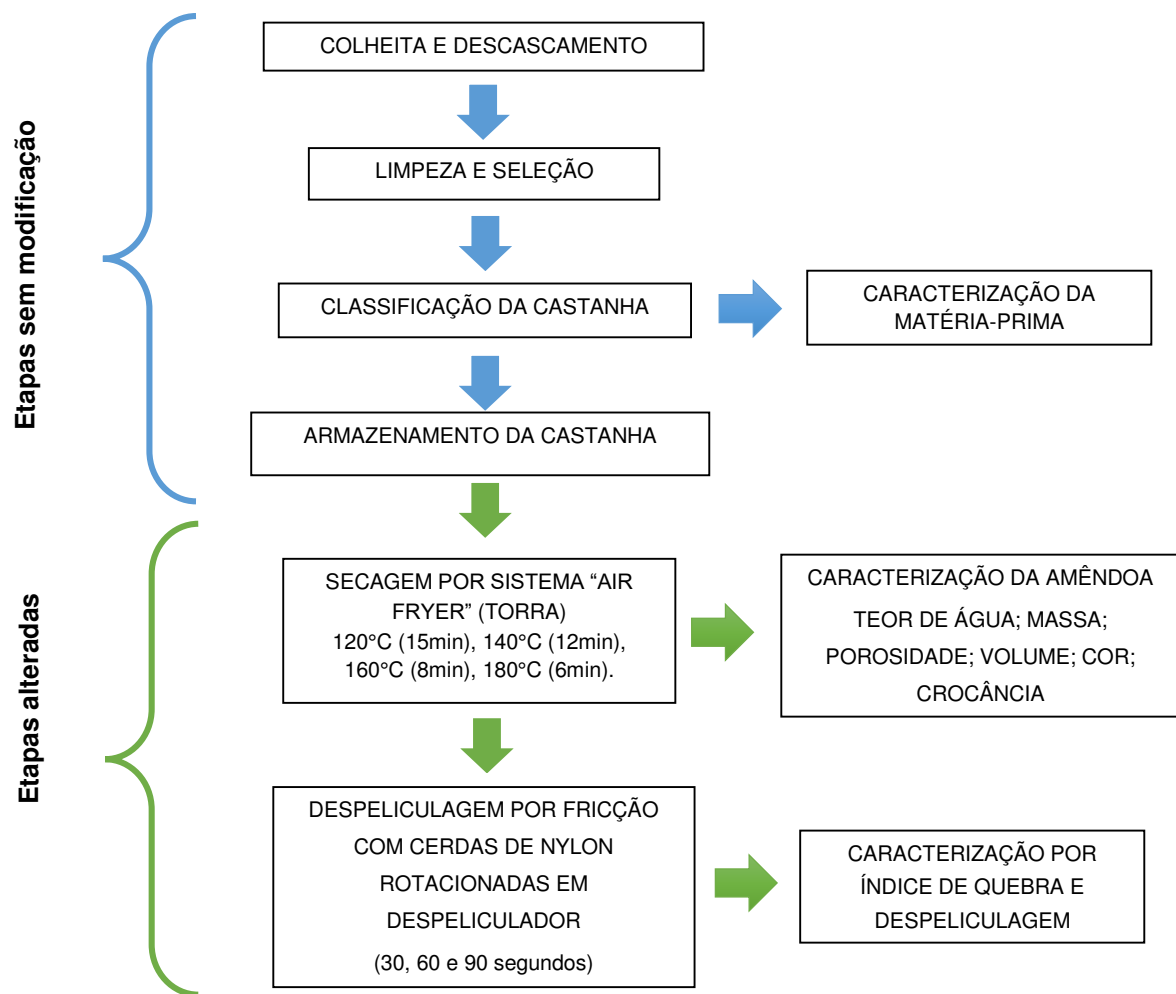


Figura 09 - Fluxograma das etapas de beneficiamento de castanha de caju proposto para esta pesquisa.

Para as 4 primeiras etapas do beneficiamento não houve alterações e para as demais foram realizados os seguintes procedimentos:

Secagem

Este processo correspondeu a torra da amêndoa, visto que foram utilizadas altas combinações de temperatura e velocidade do ar de secagem, a exemplo do que é feito nas fritadeiras comerciais, que não utilizam óleo no

processo de torra. As secagens foram realizadas nas temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C, e velocidade do ar de 3 m.s⁻¹.

A secagem em camada fina foi realizada pelo equipamento com sistema “*air fryer*”, existente no laboratório de secagem do curso de Engenharia de Alimentos, o qual permite ajustes de temperaturas, até 220 °C, trabalhando com velocidade do ar de secagem, de 3 m.s⁻¹, combinações usadas em fritadeiras comerciais.

Cinética de secagem

Nos ensaios de secagem, a perda de água foi acompanhada, efetuando-se pesagens a cada 30 segundos no início, aumentando-se gradativamente os intervalos de tempo de pesagem, visto que neste sistema, a secagem acontece de forma rápida. As cinéticas de secagem foram analisadas pelo ajuste dos modelos de Fick, Page, Thompson, Cavalcanti Mata e Henderson & Pabis aos dados experimentais.

As cinéticas de secagem foram realizadas pelo método gravimétrico (perda de água), onde as amêndoas de castanha de caju com teor de água inicial conhecido de 18,5% (b.u.) foram submetidas às temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C, até atingir o ponto de equilíbrio nessas condições. Aos dados obtidos foram aplicados os modelos matemáticos de Fick com 6 termos de série, considerando a forma cilíndrica; Page, Cavalcanti Mata e Henderson & Pabis.

Durante a realização da cinética de secagem, em todas as temperaturas, constatou-se a existência de uma taxa constante de secagem, assim o processo foi dividido em dois períodos: a) taxa constante de secagem; b) taxa decrescente secagem.

Como na taxa constante de secagem, a água é removida na ausência do fenômeno de difusão, então a equação que rege o processo é dada pelas Equações 18 e 19, onde considera-se a não existência de resistência da estrutura do produto à remoção de água.

$$\frac{d(X)}{dt} = \frac{h_d A_s}{R_v T_{abs}} (P_{vs} - P_v) \quad (18)$$

onde

$$A_s = 4 \pi r_e^2 \quad (19)$$

em que:

h_d → Coeficiente de massa convectivo, m.s^{-1}

A_s → Área da superfície do produto, m^2

R_v → Constante do gás de vapor de água $0,462 \text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

T_{abs} → Temperatura de bulbo seco, K

r_e → Raio da esfera equivalente, mm

P_{vs} → Pressão de vapor de saturação, Pa

P_v → Pressão de vapor, Pa

Caracterização das amêndoas de castanha de caju

Ao final de cada ensaio de secagem as amêndoas foram caracterizadas quanto ao teor de água (IAL, 2008); tamanho, massa, massa específica real, massa específica aparente, porosidade e volume segundo Mohsenin (1980); crocância (REIS et al., 2019) e análise de cor (CACEX, 2003).

Desenvolvimento do despeliculador

Para desenvolvimento do maquinário proposto foram realizados estudos preliminares sobre as características da castanha e sua película, como estudo das propriedades físicas e comportamento, quando manuseadas e secas, assim como também, princípios de funcionamento que pudessem promover a retirada da película com eficiência e se eram possíveis de serem utilizados no desenvolvimento do maquinário. A escolha do princípio de funcionamento foi feita com base na observação de equipamentos industriais, com finalidades semelhantes às desejadas para o equipamento que seria desenvolvido nesta pesquisa experimental.

Despeliculagem

A despeliculagem das amêndoas de castanha de caju foi realizada com o equipamento desenvolvido especificamente para esta finalidade, que também consistiu em um dos objetivos dessa pesquisa.

O despeliculador foi desenvolvido com vistas a se obter eficiência no processo de despeliculagem da amêndoa de castanha o caju pós torra. Para isso o equipamento foi desenvolvido com base em estudos preliminares da amêndoa e de sistemas funcionais importantes para serem incorporados no projeto. Esses estudos foram descritos por meio de 4 momentos, sendo 3 de pesquisa e definições e 1 de ajuste, conforme diagrama ilustrado na Figura 10.

1º momento: pesquisa e definição

Estudos preliminares para definição de como extrair o pergaminho



2º momento: teste de sistemas

Pesquisas para análise e definição preliminar do sistema funcional



3º momento: pesquisa e definição

Execução do primeiro protótipo



Alteração de ajustes necessários após testes preliminares no primeiro protótipo.



4º momento: ajustes

Desenvolvimento do equipamento final



Figura 10 - Fluxograma com descrição do processo de criação do despeliculador

1º momento: Nesse primeiro momento foram realizados estudos para entender as características da castanha e sua película, estudo como caracterização física: medidas, peso, crocância, porosidade, posição de repouso, assim como, pesquisas bibliográficas sobre o produto trabalhado. Após realização desse levantamento foram traçados requisitos necessários ao equipamento, sendo eles:

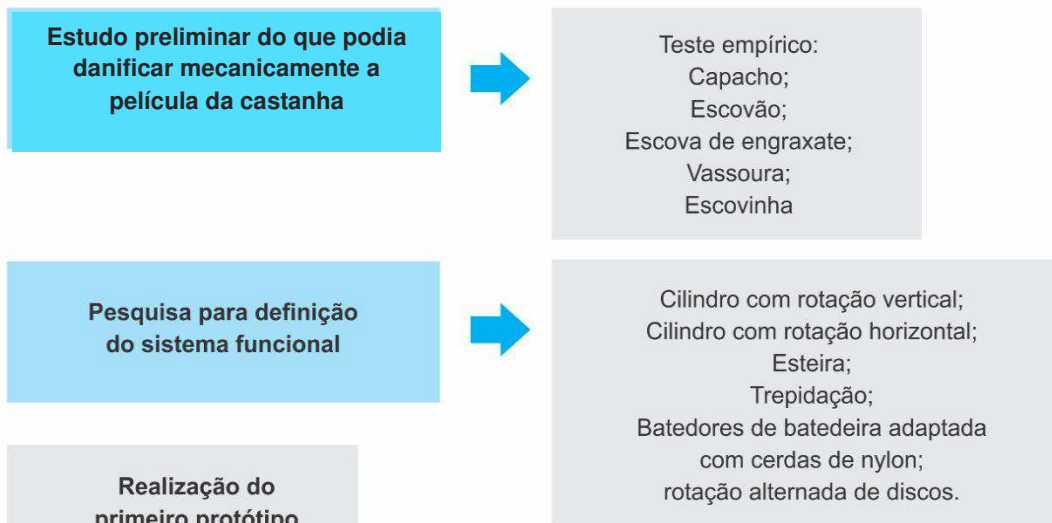
Categoria	Requisitos	Parâmetros
FUNCIONAIS	Disco com cerdas de nylon com distribuição contínua e regular	Altura variável entre os discos para ajuste pelo realizado dependendo do tamanho da amêndoa.
	Recipiente para acondicionar a castanha	
	Motor para rotação dos discos, superior e inferior	2 Motores de passos com rotação em direção alternada
	Estrutura mecânica móvel para ajuste de altura dos discos	
	Botão de acionamento liga/desliga	
	Display e botões para controle de funções	
ESTRUTURAIS	Estrutura para acomodar e fixar os componentes	
	Reservatório para acomodar as castanhas	
	Tela para exibir os parâmetros que serão controlados	
	Parafusos e porcas como sistema de fixação	

Sistema interno para rotação e
acionamento do sistema

ERGONÔMICOS	Sistema de acionamento indutivo	✓ Botão de acionamento; ✓ Botão de confirmar ação; ✓ Botões de regulagem de paramentos (+ e -); ✓ Botão reset; ✓ Visor
	Altura acessível ao controle manual	
	Dimensão de equipamento para bancada	
FORMAIS	Reservatório e disco com forma circulares	
	Base com centro de massa para proporcionar estabilidade	
MATERIAIS	Nylon, PVC e Inox	

2º momento: Nessa etapa foram realizadas pesquisas de sistemas funcionais que poderiam ser adicionados ao equipamento desenvolvido, utilizando testes em produtos com funções similares às desejadas, como furadeira, vassouras e escovas com cerdas se nylon.

3º momento: Nessa fase, após definição dos componentes e materiais necessários para o desenvolvimento do equipamento (sistema funcional), o mesmo foi materializado e testado, validando a necessidade de funcionamento dos requisitos definidos no primeiro momento, assim como o teste do sistema funcional, onde foram observados problemas no aparelho desenvolvido, e definição dos ajustes necessários para melhor eficácia do equipamento, conforme Figura 11.



Realização do primeiro protótipo



Componentes:

- Motor de rotação alternada (motor de bateadeira) (1);
- Conta giros (2);
- Painel de digital para controle (3);
- Disco superior adaptados de escovão de engraxate móvel (rotação conforme velocidade do motor) (4);
- Disco inferior adaptados de escovão de engraxate fixo na base (5);
- Corrediça (para movimentação do dispositivo de giro) (6);
- Estrutura de madeira (7).

PROBLEMAS X SOLUÇÕES

MOTOR

Rotação alternada (motor de bateadeira)	Rotação contínua (furadeira)
---	------------------------------

DISCO (montado inicialmente com escovas de engraxate)

Cerdas entufadas com grande distância; Cerdas de nylon altas; Problema na higienização da madeira;	Cerdas entufadas em cilindro de nylon com distancia de 0,5mm entre os centros; Cerdas de nylon com altura de 1cm;
--	--

PAINEL

Tela digital para exibir a rotação	Display digital do tipo nextion para programação e controle.
------------------------------------	--

ESTRUTURA

Higienização da madeira; Corrediça que não permite ajuste de altura; Disco inferior fixo proporciona repouso na castanha; Leve, logo instável.	Estrutura de inox; Ajuste de altura no display por braço mecânico automatizado; Disco inferior com rotação contínua; Estrutura robusta, centro de massa na base, logo estável.
---	---

Figura 11 - Descrição dos ajustes necessários no protótipo do maquinário desenvolvido

4º momento: Desenvolvimento do equipamento final.

Após realizar o teste do sistema funcional proposto, e detectado os problemas existentes no protótipo, o maquinário final foi desenvolvido, conforme apresentado no item 5.3.

Depois de finalizado o desenvolvimento do despeliculador, foram submetidos 3 grupos de amêndoas com 100 unidades cada, para os ensaios da máquina. Em seguida, esses grupos de amêndoas de castanha de caju foram categorizados quanto ao índice de quebra, analisando as amêndoas quebradas e inteiras, assim como índice de despeliculagem, observando as castanhas com e sem película.

Caracterização

Ao final de cada ensaio de despeliculagem, as amêndoas foram caracterizadas quanto ao teor de água (IAL, 2008); tamanho, massa, massa específica real, massa específica aparente, porosidade e volume (MOHSENIN, 1980); crocância (REIS et al., 2019) e análise de cor (CACEX, 2003).

3.3.8 Análise da cor

Para a caracterização da cor das amêndoas, foi utilizado o aplicativo de software “What a color”, e assim realizada a captação de cor de 3 pontos da castanha por meio de uma imagem (foto), feita com fonte de luz natural, sem incidência de sombra e todas realizadas no mesmo momento e distanciamento, Todas as imagens foram capturadas no mesmo dia, praticamente no mesmo horário, entre 12h00min e 12h20min. Os 3 pontos de análises foram coletados nas extremidades (fina e grossa) e centro da amostra, conforme Figura 12. Para esse estudo foram realizadas 3 repetições para cada temperatura de torra.

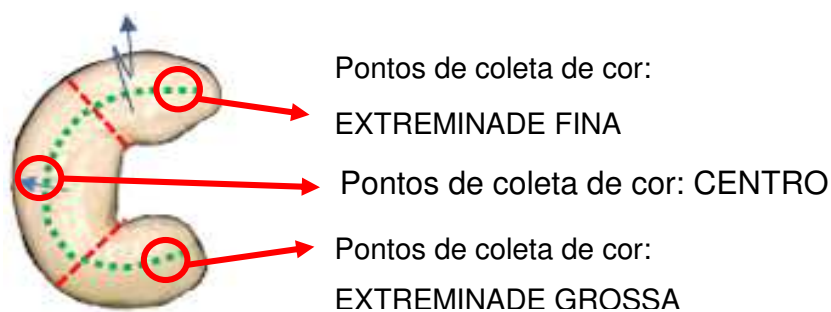


Figura 12 - Pontos de coleta de cor para análise

Após a captura de imagens foram realizadas as análises segundo a escala de código de cor CIELAB, usual em trabalhos científicos, onde são medidos os parâmetros L^* , que mede a luminosidade; a^* , intensidade de vermelho e b^* , intensidade de amarelo.

Além do uso da escala CIELAB, para tratamento estatístico dos dados de cor das amêndoas e para facilidade de classificação de estudo, também foi feita a determinação de categorização das cores, adotando-se uma escala de 1 a 9, com base no aspecto visual, na sua aparência e seguindo os padrões de comercialização adotado pela CACEX (2003), que classificam a castanha por uma faixa de cores como: Branca (9), amarelo claro (8), marfim pálido (7), cinza claro (6), marfim forte (5), amarelo forte (4), dourada (3), vermelha (2), marrom com pontos (1). Nesta escala, o valor 9 é atribuído à coloração requerida para a amêndoa de primeira classificação, que vai até a cor marfim pálido com coloração uniforme; a nota 1 é atribuída para amêndoa marrom com pontos pretos, queimada, sem nenhum valor comercial, ou seja, inaceitável.

3.4 Análise estatística

Os dados experimentais foram submetidos à análise de variância (ANOVA) aos níveis de 5% e 1% de probabilidade, e as respostas qualitativas significativas foram submetidas ao teste de Tukey adotando-se o mesmo nível de significância. Alguns dados também foram tratados por análise de variância segundo um experimento fatorial. Para o desenvolvimento das análises estatísticas foi utilizado o software ASSISTAT 7.7 (SILVA & AZEVEDO, 2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características das amêndoas de castanha de caju *in natura* (cruas)

4.1.1 Teor de água

O teor de água médio inicial das amêndoas “*in natura*” foi 18,63 % b.u. As amêndoas de castanha de caju utilizadas nesta pesquisa foram adquiridas na indústria, logo após o descastanhamento, portanto cruas, e não foram encontrados relatos de estudos com amêndoas neste estágio para que se possa fazer uma comparação de valores. Outro fator importante é o termo crua, utilizado comercialmente, e que geralmente é usado, erroneamente, como referência à amêndoa com torra clara, branca e com teor de água entre 5 e 6% b.u., portanto não pode ser comparada à matéria prima utilizada nesta pesquisa.

4.1.2 Tamanho

A média das dimensões a (comprimento), b (largura) e c (espessura) das amêndoas de castanha de caju, antes dos tratamentos térmicos de secagem estão dispostas na Tabela 06.

Tabela 06 - Média das dimensões das amêndoas *in natura*

Amostras	a (mm)	b (mm)	c (mm)
<i>In natura</i>	30,914 ± 0,71	20,995 ± 0,41	13,721 ± 0,61

4.1.3 Massa, volume, massa específica real, massa específica aparente e porosidade

Os valores médios de massa, a massa específica real, massa específica aparente, volume e porosidade das amêndoas de castanha de caju *in natura*, estão apresentados na Tabela 07.

Tabela 07 - Valores médios da massa (m), massa específica real (ρ), volume por deslocamento, porosidade (ϵ) e área superficial (a_s) da castanha de caju.

Amostras	Massa (g)	Volume (cm ³)	Massa específica real (g.cm ⁻³)	Massa específica aparente (g.cm ⁻³)	Área Superficial (cm ²)	Porosidade (%)
<i>In natura</i>	3,534	3,586 ±	0,990 ±	0,644 ±	30,41±	58,75% ±
	± 0,17	0,25	0,03	0,0058	2,91	0,01

Para análise das amêndoas de castanha de caju existe uma escala que as caracterizam dentro de um padrão estabelecido pela FAO (2015) e CACEX (2003), conforme a sua massa. Considerando esta escala, as amêndoas utilizadas para esta pesquisa são classificadas entre SLW2 e LW1, que correspondem em massa, aos valores médios entre 3,500(g) e 2,900 (g), respectivamente.

4.1.4 Crocância da amêndoa *in natura*

A crocância das amêndoas de castanhas de caju *in natura*, medidas com o equipamento Texturômetro TA.XT PLUS, com velocidade de 1mm/s e distância de penetração 5mm, utilizando o probe P/2, foi em média 15,49 N.

4.2 Secagem

4.2.1 Cinética de secagem

Na Figura 13 encontram-se os dados experimentais da cinética de secagem da amêndoa de castanha de caju nas temperaturas de 120, 140,160, e 180°C, expressos como razão de teor de água (adimensional) em função do tempo de secagem (segundos).

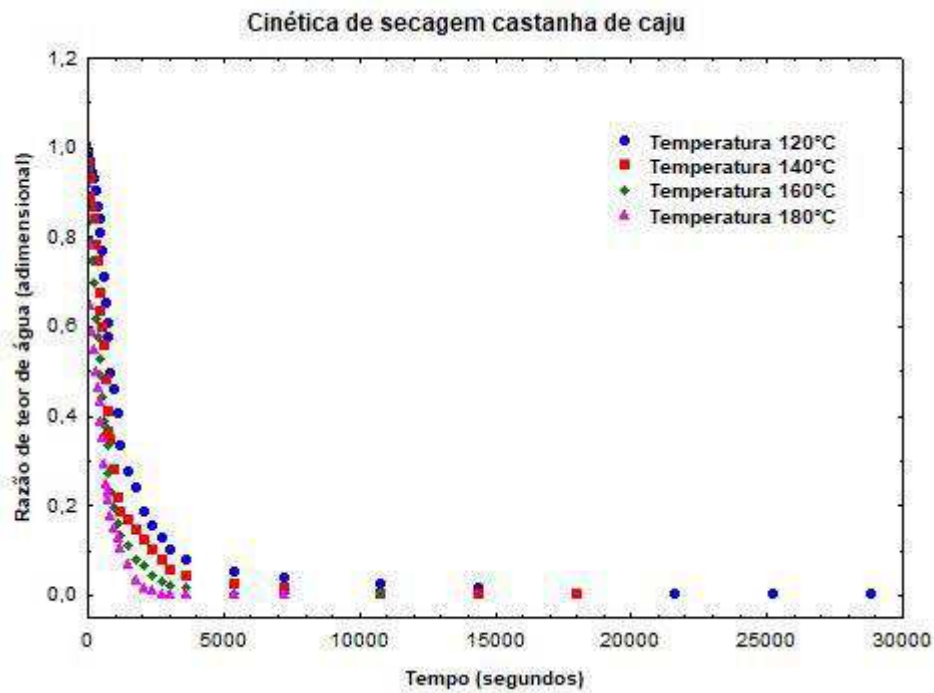


Figura 13 - Dados experimentais da secagem de castanha de caju nas temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C com velocidade do ar de 3m.s⁻¹

Analisando-se a Figura 13, observa-se que o processo de secagem das amêndoas de castanha de caju apresentou, em todas as temperaturas, a existência de uma diminuição rápida do teor de água em função do tempo, assim caracterizando uma taxa constante de secagem a partir 18,63% até o teor de água aproximadamente de 15,63% b.u para todas as temperaturas estudadas.

4.2.2 Taxa constante

Na Figura 14, se encontram as curvas obtidas na cinética de secagem das amêndoas de castanha de caju, nas temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C e velocidades do ar de secagem de 3m.s⁻¹.

Pela análise da Figura 14 percebe-se claramente que existe decréscimo rápido do teor de água, do valor inicial de 18,63% b.u. até cerca de 15,63% b.u., o que corresponde ao tempo de 570, 420, 210 e 90 segundos, respectivamente, para as temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C, caracterizando a existência, nesse trecho, de taxa constante de secagem.

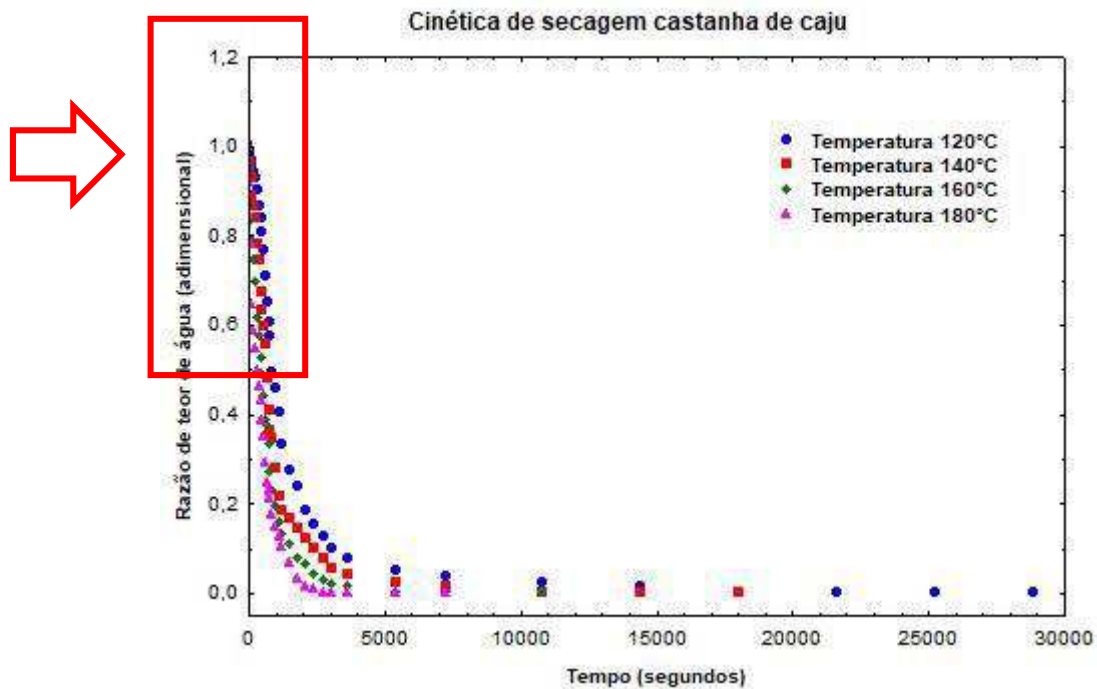


Figura 14 - Cinética de secagem de amêndoas de castanha de caju, nas temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C, com velocidade do ar de secagem de 3m.s^{-1} , com indicação, em destaque para a taxa constante de secagem.

Na Figura 14 pode-se observar os períodos de taxa constante de secagem da amêndoa de castanha de caju, onde se verifica uma variação de 4×10^{-7} até $2,4 \times 10^{-6} \text{ kg.s}^{-1}$ de retirada de água em função da variação de temperatura de secagem de 120 a 180°C, respectivamente.

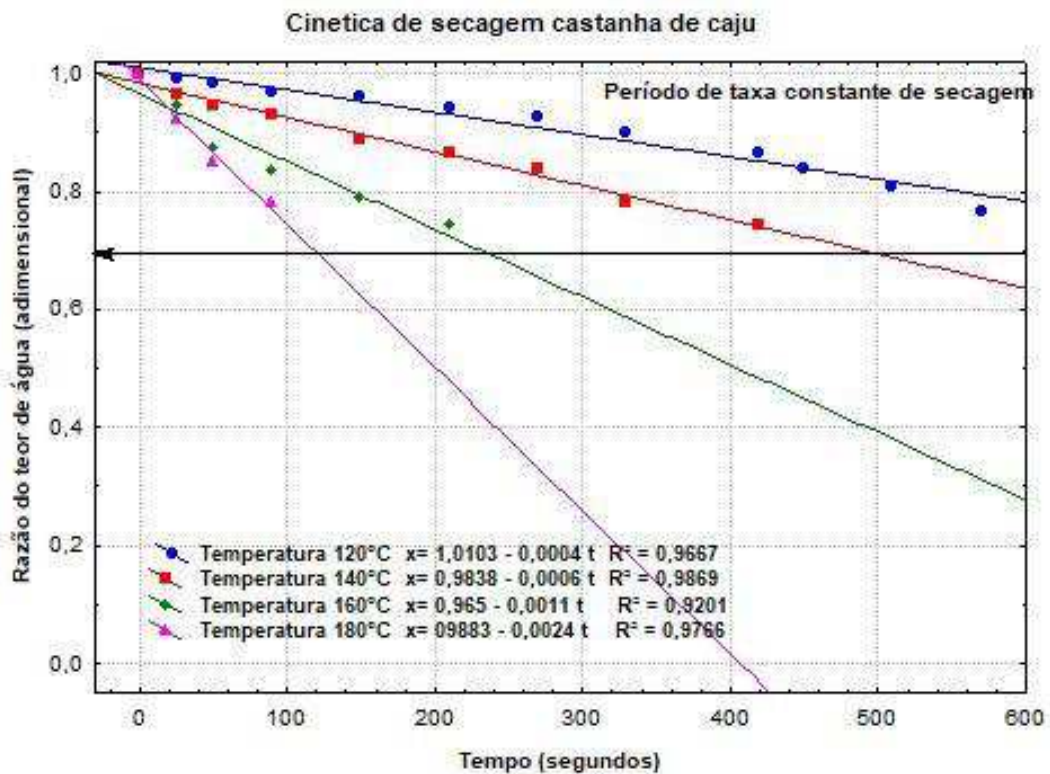


Figura 15 - Ajustes por regressão linear realizados para Taxa constante, identificada na cinética de secagem de amêndoas de castanha de caju, nas temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C, com velocidade do ar de secagem de 3m.s⁻¹.

4.2.1.1 Coeficiente de transferência de massa convectivo (h_m)

Na Tabela 08 contém os valores do coeficiente de transferência de massa convectivo global (h_m) calculado para a taxa constante de secagem de amêndoas de castanha de caju às temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C e velocidade do ar de secagem de 3 m.s⁻¹.

Tabela 08 - Dados técnicos do período de taxa constante de secagem de castanha de caju e coeficiente de transferência de massa convectivo global, $m \cdot s^{-1}$ (h_m) obtidos para a taxa constante de secagem de amêndoas de castanha de caju.

Temperatura		A_s	r_e	R_v	P_{vs}	P_v	dX/dt	h_m
°C	K	m^2	m	$kJ \cdot kg \cdot K^{-1}$	Pa	Pa	$k \cdot s^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$
120	393,15	$1,5197 \times 10^{-3}$	0,0108	0,462	197,57	167,94	4×10^{-7}	$1,395 \times 10^{-2}$
140	413,15	$1,5197 \times 10^{-3}$	0,0108	0,462	359,93	305,94	6×10^{-7}	$1,566 \times 10^{-2}$
160	433,15	$1,5197 \times 10^{-3}$	0,0108	0,462	616,28	523,84	$1,1 \times 10^{-6}$	$1,613 \times 10^{-2}$
180	453,15	$1,5197 \times 10^{-3}$	0,0108	0,462	1000,86	850,73	$2,4 \times 10^{-6}$	$2,202 \times 10^{-2}$

Pelos dados contidos na Tabela 08 pode-se constatar uma variação de 0,01395 a 0,0220 $m \cdot s^{-1}$ em função da variação de temperatura de 120 para 180°C, com fluxo de ar de 3 $m \cdot s^{-1}$, assim observa-se que para temperaturas mais altas o coeficiente de transferência de massa convectivo é maior, observando-se que quanto maior a temperatura de secagem, maior a eficiência da secagem e menor o tempo de duração da taxa constante.

Segundo Botelho et al. (2011), o coeficiente de transferência de massa convectiva define a taxa de transferência massa sem quantificá-la, sendo este coeficiente importante para explicar a variação das taxas de secagem para várias temperaturas. Não foram encontrados valores dos coeficientes de transferência de massa convectivo para o produto em questão, principalmente nas condições exclusivas deste trabalho. Porém, comparando os dados desta pesquisa com os dados encontrados por Touré & Kibangu-Nkembo (2004), que encontraram 0,00974 $m \cdot s^{-1}$ para manga; 0,00475 $m \cdot s^{-1}$ para raízes de mandioca; e 0,00876 e 0,00943 $m \cdot s^{-1}$ para duas variedades de banana, trabalhando com temperaturas e velocidades do ar de secagem, menores do que as estudadas nesta experimento, pode-se considerar que os resultados, pouco maiores, encontrados nesta experimento, estão dentro do esperado.

4.2.3 Taxa Decrescente

Observou-se no processo de secagem de amêndoas de castanhas de caju a existência de uma taxa constante de secagem durante o período inicial,

para todas as temperaturas, seguida de um período a taxa decrescente de secagem. Assim foram aplicados os modelos de Fick, com até 6 termos da série; Page, Cavalcanti Mata e Henderson & Pabis, apenas para os dados correspondentes à taxa decrescente de secagem às temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C.

As Figuras de 16 a 24 ilustram as curvas obtidas pelo ajuste dos modelos de Fick, Page, Cavalcanti Mata e Henderson & Pabis aos dados experimentais da cinética de secagem das castanha de caju nas temperaturas 120, 140, 160 e 180 °C, com velocidade do ar 3m.s⁻¹.

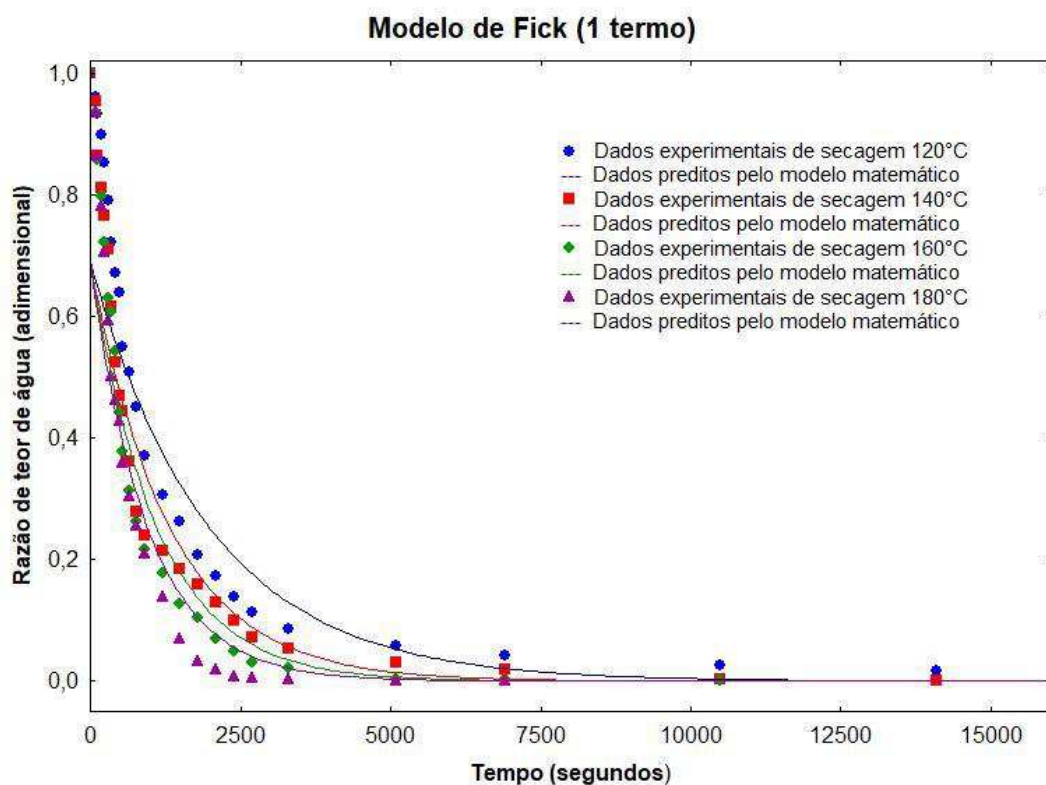


Figura 16 - Curvas de secagem de amêndoas de castanha de caju, obtidas às temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C, velocidade do ar de secagem de 3m.s⁻¹, com ajustes segundo o modelo de Fick, com 1 termo da série.

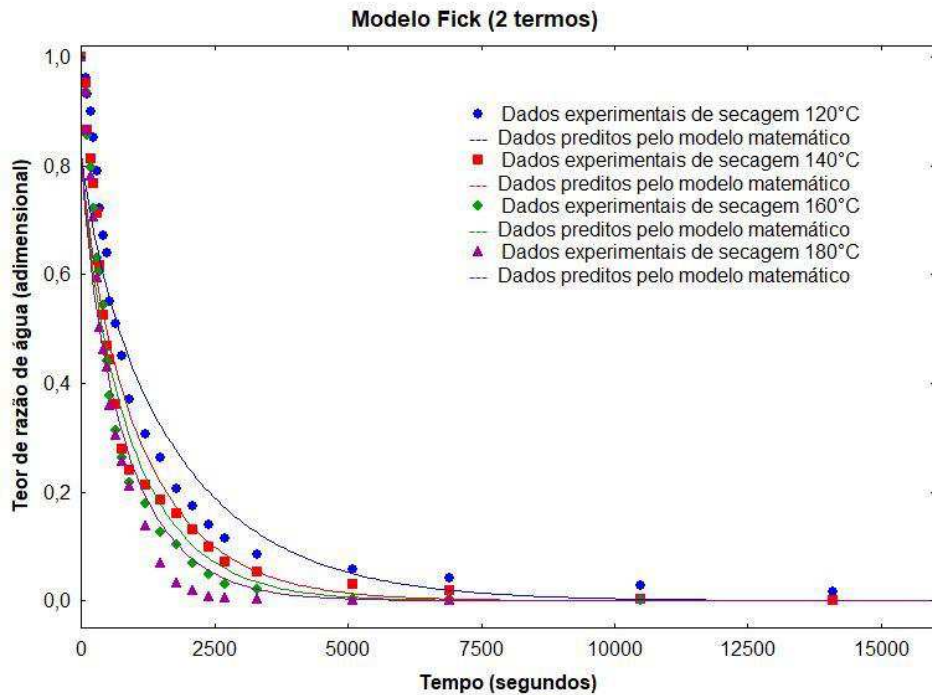


Figura 17 - Curvas de secagem de amêndoas de castanha de caju obtidas às temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C, velocidade do ar de secagem de 3m.s⁻¹, com ajustes segundo o modelo de Fick, com 2 termos da série.

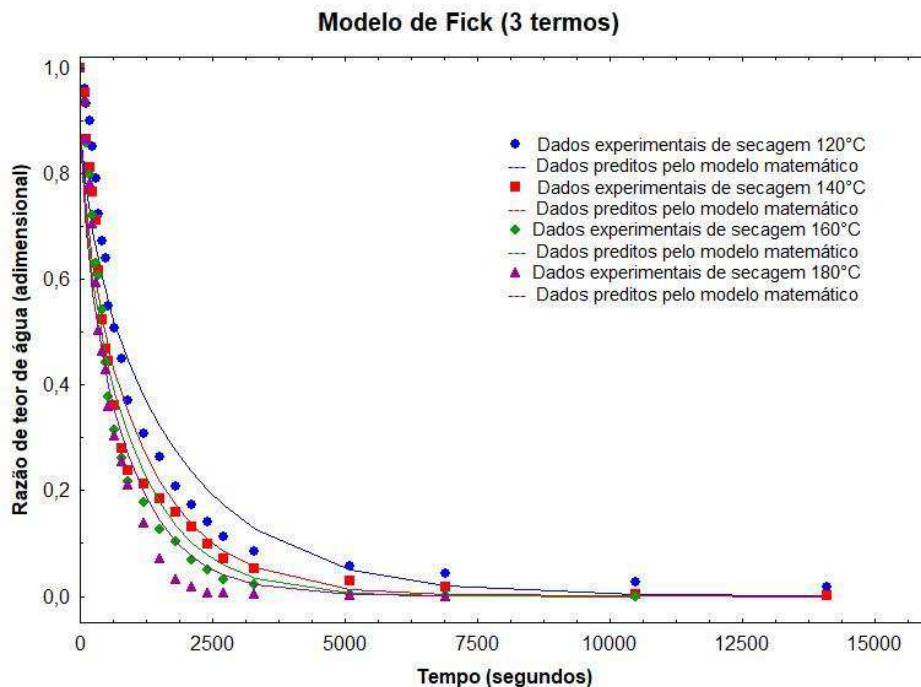


Figura 18 - Curvas de secagem de amêndoas de castanha de caju obtidas às temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C, velocidade do ar de secagem de 3m.s⁻¹, com ajustes segundo o modelo de Fick, com 3 termos da série.

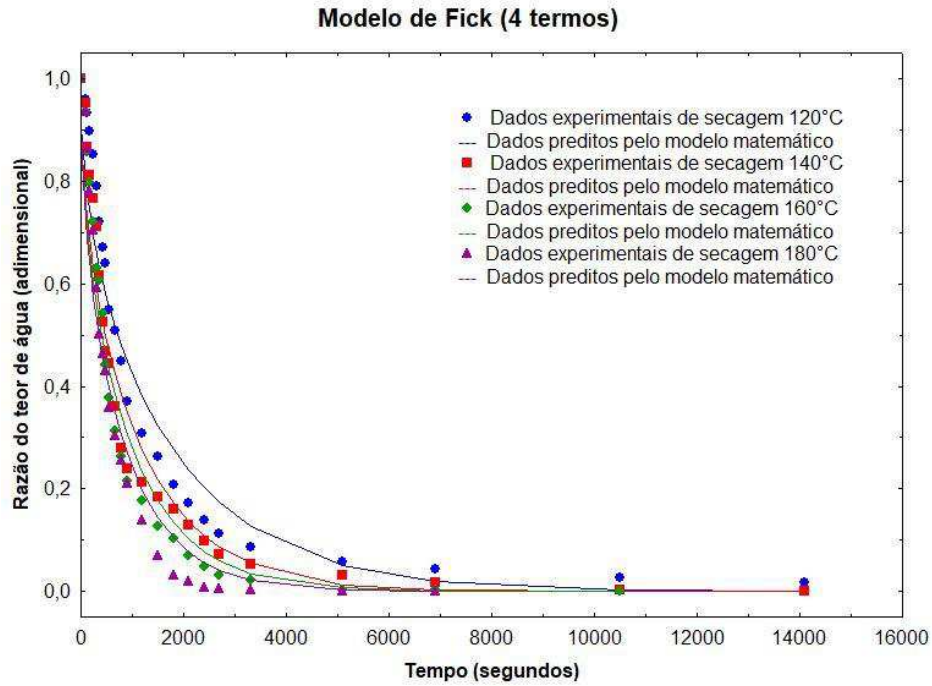


Figura 19 - Curvas de secagem de amêndoas de castanha de caju obtidas às temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C, velocidade do ar de secagem de 3m.s⁻¹, com ajustes segundo o modelo de Fick, com 4 termos da série.

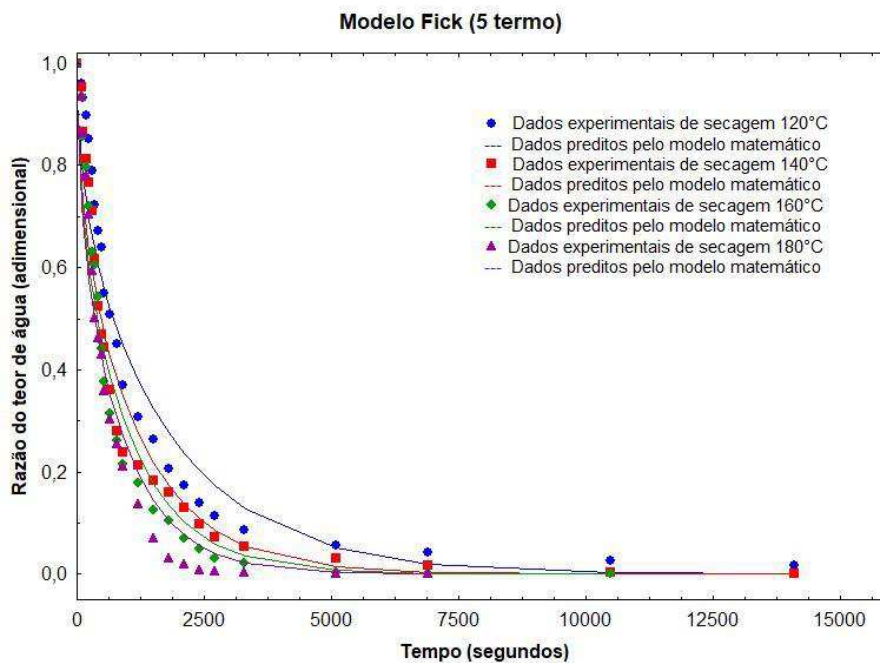


Figura 20 - Curvas de secagem de amêndoas de castanha de caju, obtidas às temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C, velocidade do ar de secagem de 3m.s⁻¹, com ajustes segundo o modelo de Fick, com 5 termos da série.

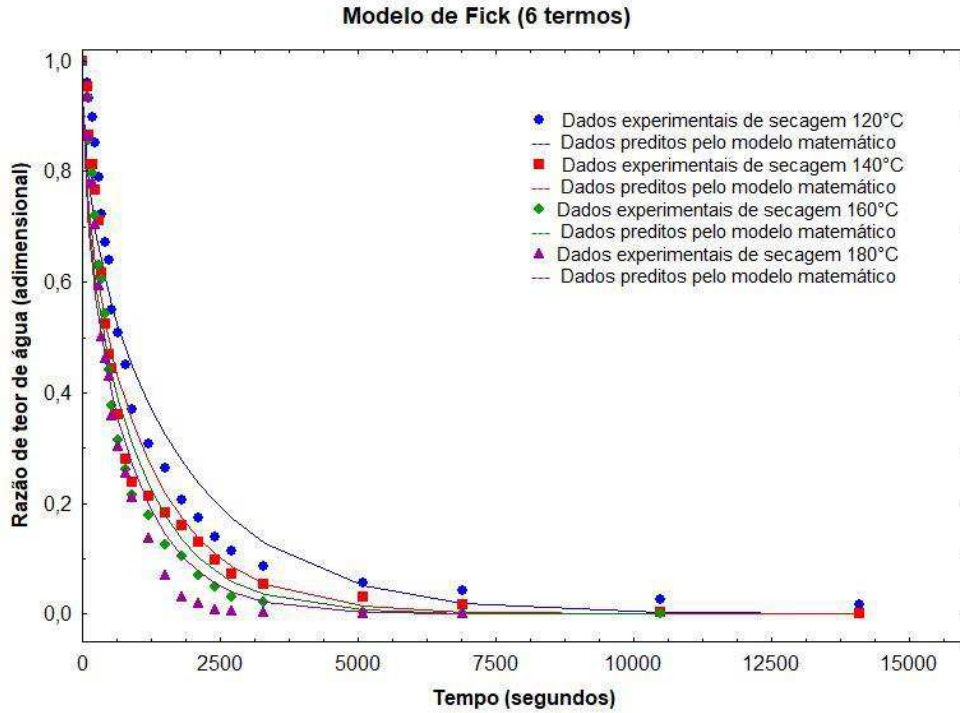


Figura 21 - Curvas de secagem de amêndoas de castanha de caju obtidas às temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C, velocidade do ar de secagem de $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, com ajustes segundo o modelo de Fick, com 6 termos da série.

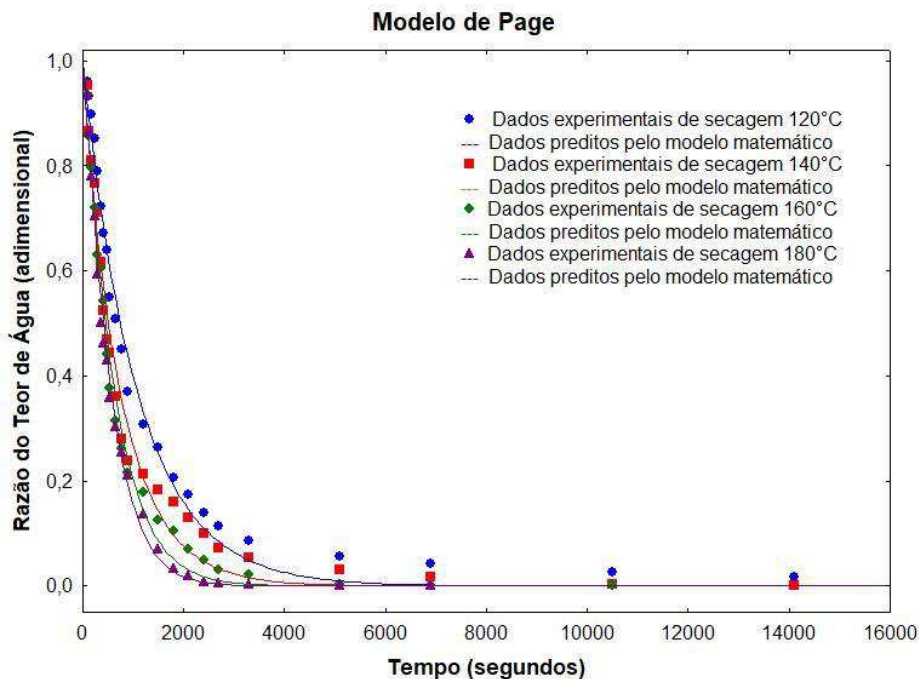


Figura 22 - Curvas de secagem de amêndoas de castanha de caju obtidas às temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C, velocidade do ar de secagem de $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, com ajustes segundo o modelo Page.

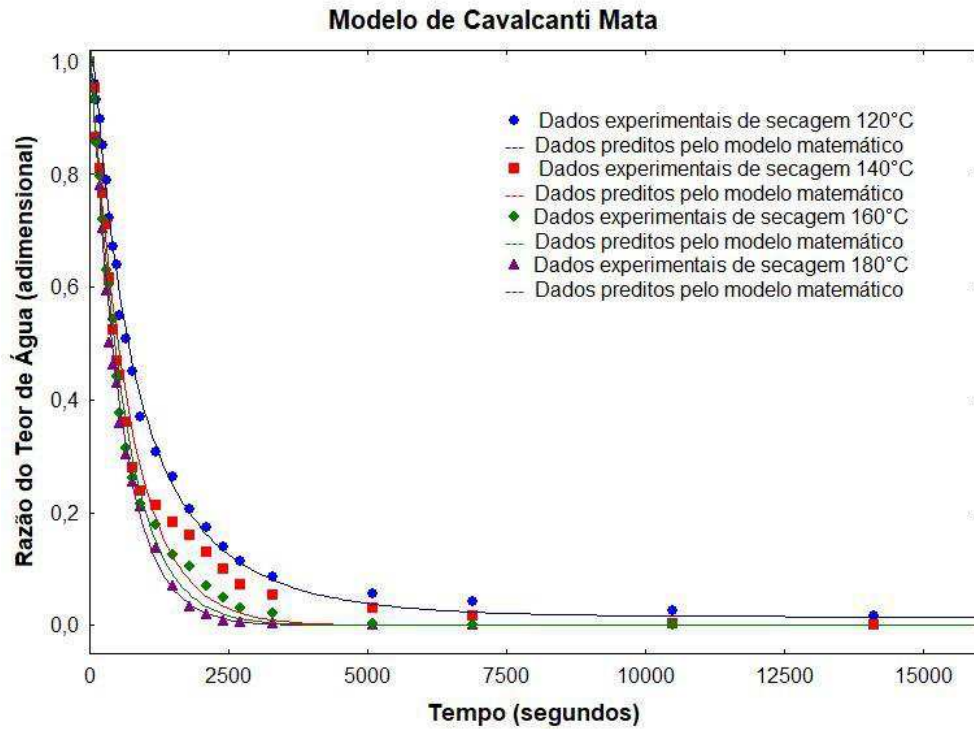


Figura 23 - Curvas de secagem de amêndoas de castanha de caju obtidas às temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C, velocidade do ar de secagem de $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, com ajustes segundo o modelo Cavalcanti Mata.

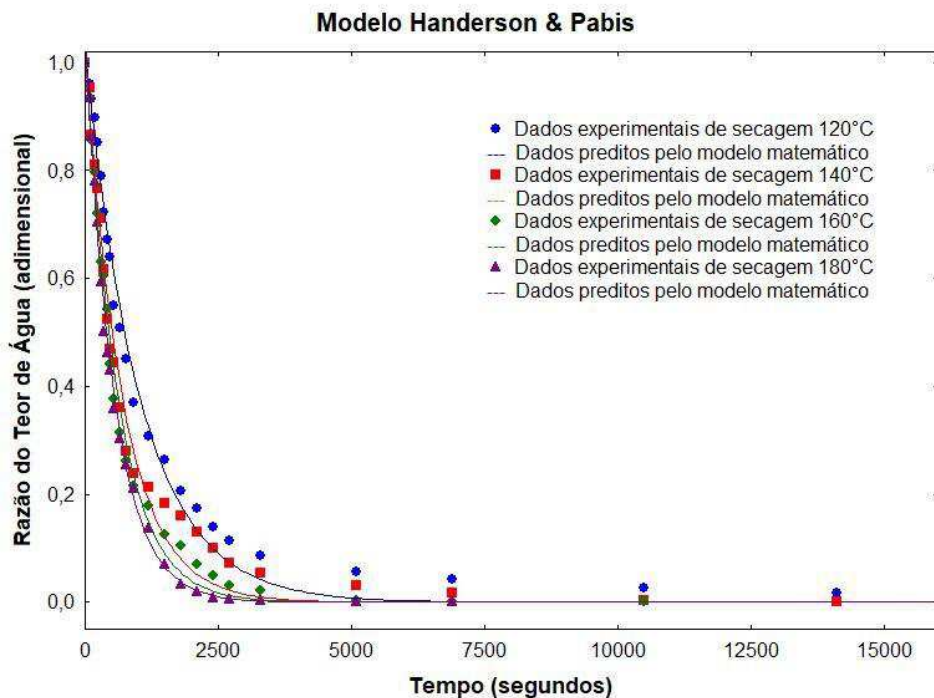


Figura 24 - Curvas de secagem de amêndoas de castanha de caju obtidas às temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C, velocidade do ar de secagem de $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, com ajustes segundo o modelo Henderson e Pabis.

Com base nas curvas e secagem, observa-se em todas as temperaturas e modelos estudados, que com o aumento da temperatura de secagem há uma redução no tempo de secagem, assim, a relação entre a temperatura utilizada no processo é inversamente proporcional ao tempo gasto para que as castanhas atinjam o teor de água de equilíbrio, sendo a perda de água das amostras mais intensa no início da secagem, o que também foi constatado por Nascimento et al. (2019), que analisou o processo de secagem de amêndoas de Castanha do Brasil, em estufa, nas temperaturas de 70 e 100 °C, que ocorreram em 240 e 120 min, respectivamente.

O comportamento das curvas de secagem da castanha de caju foi diferenciado quando comparado com outros produtos agrícolas. Não foram encontrados estudos para secagem de amêndoas de castanha de caju em temperaturas superiores a 100 °C, semelhantes aos feitos neste trabalho, em que ficou evidenciado a taxa k constante de secagem. Diferente desta pesquisa, Nogueira (2011) estudou a secagem da castanha do Brasil, a fruta inteira, em condições de floresta, por convecção natural, e pelo estudo da cinética o autor levantou a hipótese que o tegumento da castanha de caju dificulta a migração da água do interior da semente para a superfície que fica em contato com o ar de secagem, porém, em condições de secagem natural, o autor não observou existência de taxa constante de secagem.

Neste trabalho, diferente do que é feito normalmente, foram estudadas as curvas de secagem das amêndoas de castanha de caju, com pergaminho, em temperaturas acima de 100 °C e alta velocidade do ar de secagem, 3 m.s^{-1} , com o intuito de, além de baixar o teor de água, promover a torra da amêndoa. Faz-se necessário uma maior investigação do processo, para observação do pergaminho que reveste a amêndoa, com lente específica, durante a secagem, para identificar a influência deste revestimento no comportamento da curva de secagem e na existência da taxa constante em tais temperaturas.

Nas Tabelas 09 e 10 são apresentados os parâmetros referentes aos modelos matemáticos de Fick, Page, Cavalcanti Mata e Henderson & Pabis, os valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2) e o desvio quadrático médio (DQM), ajustados à cinética de secagem da castanha do caju nas temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C, com teores médios de água inicial de 18% base úmida e velocidade do ar secagem de 3 m.s^{-1}

Tabela 09- Parâmetros obtidos pelo ajustado modelo proposto por Fick aos dados experimentais de secagem de amêndoas de castanha de caju, nas temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C e velocidade do ar 3m/s, por meio de regressão não linear.

Modelo Difusional de Fick						
1° Termo			2° Termo		3° Termo	
T (°C)	D_{ef.}(x10⁻⁹m²/s)	R² (%)	D_{ef.}(x10⁻⁹m²/s)	R² (%)	D_{ef.}(x10⁻⁹m²/s)	R² (%)
120	6,3179	92,11	6,4454	96,33	6,3947	97,07
140	9,4847	92,31	9,6683	96,19	9,6080	96,87
160	11,2943	92,20	11,3892	96,05	11,319	96,70
180	13,1359	92,13	13,1611	95,84	13,075	96,46

4°Termo		5°Termo		6°Termo		DQM
D_{ef.} (x10⁻⁹m²/s)	R² (%)	D_{ef.} (x10⁻⁹m²/s)	R² (%)	D_{ef.} (x10⁻⁹m²/s)	R² (%)	
6,3683	97,27	6,3580	97,34	6,3542	97,38	1,06X10 ⁻¹
9,5818	97,05	9,5734	97,13	9,5711	97,16	0,789 X10 ⁻¹
11,2938	96,88	11,2868	96,95	11,2850	96,99	0,648 X10 ⁻¹
13,0484	96,64	13,0423	96,71	13,0410	96,75	0,514 X10 ⁻¹

No modelo de Fick, considerando a forma geométrica cilíndrica, foram utilizados 6 termos da série infinita, tendo em vista que acima dessa quantidade não houve variação considerável no coeficiente de difusividade efetiva nem melhora significativa no ajuste das curvas da cinética de secagem.

Nota-se, pelos dados na Tabela 09, que o modelo de Fick representa satisfatoriamente os dados de secagem da castanha de caju, visto que apresentaram coeficientes de determinação maiores que 96,64% e desvios quadráticos médios inferiores a 0,11. Observa-se ainda, que o valor do coeficiente de difusividade aumenta com o aumento da temperatura de secagem. Isso ocorre porque, segundo Sousa et al. (2017), a difusividade representa a velocidade com que a água migra do interior para a superfície do produto. Os valores do coeficiente de difusividade efetiva obtidos neste trabalho variaram entre 6,3179x10⁻⁹ a,13,1611x10⁻⁹ m².s⁻¹.

Tabela 10 - Parâmetros obtidos pelo ajuste do modelo proposto por Page, Cavalcanti Mata e Henderson e Pabis por meio de regressão não linear para diferentes condições de temperatura

Modelo de Page				
T(°C)	D_{ef.} (x10⁻⁸ m²/s)	n	R² (%)	DQM
120	1,22078	0,991543	99,54	5,84X10 ⁻²
140	1,29345	1,042346	98,09	6,37 X10 ⁻²
160	1,36612	1,054841	99,54	4,54 X10 ⁻²
180	1,43880	1,065368	99,48	2,19 X10 ⁻²

Modelo Cavalcanti Mata								
T (°C)	A₁	D_{ef.} (10⁻⁹m²/s)	n₁	A₂	n₂	A₃	R² (%)	DQM
120	-0,050119	4,038	0,00013	0,92969	0,875231	0,0122	99,73	6,64 X10 ⁻⁸
140	-6,29465	4,5035	0,000001	1,007923	0,969926	6,3328	99,21	1,43 X10 ⁻²
160	0,496153	4,889	1,149949	0,537925	1,047597	0,0149	99,41	1,15 X10 ⁻³
180	-0,698306	5,227	0,00035	1,064067	0,973358	0,6967	99,54	1,13 X10 ⁻⁷

Modelo de Henderson & Pabis				
T (°C)	A	D_{ef.} (x10⁻⁸m²/s)	R²(%)	DQM
120	1,027319	1,20922	99,57	4,67 X10 ⁻²
140	1,026177	1,77036	99,06	6,21 X10 ⁻²
160	1,039131	2,03702	99,58	2,91 X10 ⁻²
180	1,052810	2,31099	99,76	1,21 X10 ⁻⁴

Os modelos de Page, Cavalcanti Mata e Henderson & Pabis apresentaram coeficiente de determinação (R²) maiores que 98,09; 99,21 e 99,06% e o DQM inferior a 2,19 x10⁻²; 6,64 x10⁻⁸ e 1,21 x 10⁻⁴, respectivamente, indicando uma representação satisfatória para o processo de secagem, em todas as temperaturas estudadas. Martins et al. (2014), ao selecionar um modelo não linear para descrever um processo de secagem, ressaltou a necessidade de avaliar, não somente os valores de R², mas que se deve considerar também os desvios quadráticos médios (DQM).

Ainda analisando a Tabela 10, observou-se uma tendência de aumento da difusividade efetiva com a elevação da temperatura. Teixeira et al. (2015)

avaliaram a cinética de secagem da amêndoa de baru e encontraram valores de difusividade de $18,15 \times 10^{-11}$ a $37,08 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, respectivamente. O mesmo comportamento também foi observado nos valores do parâmetro “n” no modelo de Page e nos valores do parâmetro “A” de Henderson & Pabis. Pela análise dos dados de difusividade de amêndoas de baru obtidos por Teixeira et al. (2015), pode-se exaltar a coerência com este estudo, visto que o autor usou temperaturas menores que as deste trabalho e também encontrou valores de difusividade menores. Como não há, na literatura dados de secagem de amêndoas, em temperaturas igual ou maiores que a 120°C, é importante comparar, mesmo que com outra oleaginosa, resguardando as devidas condições. Assim, pode-se dizer que existe uma certa coerência em se obter difusividades da ordem de 10^{-8} nas condições deste estudo, valores estes maiores que os obtidos por Teixeira et al. (2015), para castanha de baru, que estão na ordem de 10^{-11} , isto ao destacar as temperaturas e velocidade do ar utilizadas nesta pesquisa e o fato de que o aumento da difusividade está ligado diretamente ao aumento da temperatura.

Araújo et al. (2017) estudaram a modelagem matemática da secagem do amendoim em camada delgada e verificaram que com a elevação da temperatura, houve aumento nos valores encontrados para o parâmetro “K”, e esses valores indicam que a taxa de secagem se eleva com o aumento da temperatura do ar. Para o parâmetro “n” do modelo de Page, não houve nenhuma tendência observada em seus valores em função do incremento da temperatura. Já para Silva et al. (2020), a cinética de secagem das nozes sem cascas tornou evidente que a temperatura foi a variável de maior influência no processo, e que a constante de secagem “K” aumentou com a sua elevação, e o tempo do processo diminuiu em função do seu aumento.

Nascimento et al. (2018) realizaram um estudo de secagem convectiva de amêndoas de girassol nas temperaturas de 60, 70 e 80°C e observaram que o modelo de Henderson e Pabis se comportou de forma aleatória no processo.

Ainda na tabela 10 nota-se que os parâmetros do modelo de Cavalcanti Mata não apresentaram comportamento definido com incremento da temperatura de secagem. Rabelo et al. (2016) realizaram a modelagem matemática do processo de secagem da amêndoas de andiroba e também obtiveram bons ajustes utilizando o modelo de Cavalcanti Mata.

4.2.3 Energia de ativação, entalpia, entropia e energia livre de Gibbs

Na Tabela 11, encontram-se os valores das propriedades termodinâmicas: entalpia, entropia e a energia livre de Gibbs, analisados durante a secagem da castanha do caju para os modelos matemáticos de Page, Cavalcanti Mata, Fick e Henderson & Pabis.

Tabela 11- Valores da energia de ativação para a amendoa de castanha de caju durante as cinéticas de secagem nas temperaturas de secagem de 120, 140, 160 e 180°C, para os modelos matemáticos de Fick, Page, Cavalcanti Mata e Henderson & Pabis.

Modelos	Energia de ativação (kJ. mol ⁻¹)
Fick	15,86
Page	4,06
Cavalcanti-Mata	6,30
Henderson & Pabis	14,27

A energia de ativação encontrada no processo de secagem de amêndoas de castanha de caju foi de 15,86 kJ. mol⁻¹ para o modelo de Fick, 4,06 kJ.mol⁻¹ para o modelo de Page, 6,30 kJ.mol⁻¹ para o modelo de Cavalcanti Mata e 14,27 kJ.mol⁻¹ para o modelo de Henderson & Pabis. De acordo com CORRÊA *et al.* (2007), a energia de ativação é a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto, desta forma observa-se que a equação de Fick apresentou o maior valor de energia de ativação no processo de secagem de castanha de caju.

Segundo Araújo *et al.*, 2017, a energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem na equação de Page foi de aproximadamente 35,24 kJ mol⁻¹, para os frutos de amendoim, na faixa de temperatura de 40; 50; 60 e 70 °C. Na literatura especializada, são encontrados valores da energia de ativação para diversos produtos agrícolas (BOTELHO *et al.*, 2018; DUARTE *et al.*, 2020, QUEQUETO *et al.*, 2017, SANTOS *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020). E ainda, para os produtos agrícolas a energia de ativação deve estar entre 12,7 a 110 kJ mol⁻¹ (ZOGZAS *et al.*,1996). Assim, os valores encontrados neste trabalho para todos os modelos apresentam-se dentro da faixa

Na Tabela 12, encontram-se os valores das propriedades termodinâmicas: entalpia, entropia e a energia livre de Gibbs, analisados durante

a secagem da castanha de caju para os modelos matemáticos de Fick, Page, Cavalcanti Mata e Henderson e Pabis.

Tabela 12 - Propriedades termodinâmicas obtidas pela cinética de secagem da castanha de caju nas temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C: entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG) para o modelo matemáticos Fick, Page, Cavalcanti Mata e Henderson & Pabis

Fick				
Temperatura (°C)	K	Entalpia (ΔH) J mol ⁻¹	Entropia (ΔS) J mol ⁻¹ K ⁻¹	Energia Livre Gibbs (ΔG) J mol ⁻¹
120	393,15	12590,471	- 190,652	87545,452
140	413,15	12424,191	-191,065	91362,659
160	433,15	12257,911	-191,548	95187,919
180	453,15	12091,631	-191,833	99020,858
Page				
Temperatura (°C)	K	Entalpia (ΔH) J mol ⁻¹	Entropia (ΔS) J mol ⁻¹ K ⁻¹	Energia Livre Gibbs (ΔG) J mol ⁻¹
120	393,15	792,521	-235,228	93272,251
140	413,15	626,241	-235,640	97980,963
160	433,15	459,961	-236,033	102697,727
180	453,15	293,681	-236,408	107422,171
Cavalcanti-Mata				
Temperatura (°C)	K	Entalpia (ΔH) J mol ⁻¹	Entropia (ΔS) J mol ⁻¹ K ⁻¹	Energia Livre Gibbs (ΔG) J mol ⁻¹
120	393,15	3027,157	-219,520	89331,339
140	413,15	2860,877	-219,932	93725,893
160	433,15	2694,597	-220,325	98128,499
180	453,15	2528,317	-220,701	102538,786
Henderson e Pabis				
Temperatura (°C)	K	Entalpia (ΔH) J mol ⁻¹	Entropia (ΔS) J mol ⁻¹ K ⁻¹	Energia Livre Gibbs (ΔG) J mol ⁻¹
120	393,15	10996,741	-208,549	92987,948
140	413,15	10830,461	-208,962	97163,096
160	433,15	10664,181	-209,355	101346,296
180	453,15	10497,901	-209,730	105537,177

Observa-se que com o aumento da temperatura o valor da entalpia diminui em todos os modelos estudados, assim, valores menores de entalpia indicam menor energia necessária para remover a água ligada ao produto durante a secagem (CARVALHO et al., 2020).

A entropia (ΔS) variou de - 190,65 a -191,83 J.mol⁻¹K⁻¹, segundo Fick; de -235,23 a -236,41 J.mol⁻¹K⁻¹ conforme Page; -219,52 a -220,70 J.mol⁻¹K⁻¹ segundo Cavalcanti Mata e de -208,55 para 209,73 J.mol⁻¹K⁻¹ por Henderson & Pabis, respectivamente, para temperaturas variando de 120 a 180°C, constatando-se que este valor apresenta poucas variações com o aumento da temperatura. Segundo Jideani & Mpotokwana (2009), isso ocorre em virtude da menor excitação das moléculas de água e aumento grau de ordem entre o sistema água e produto.

A energia livre de Gibbs (ΔG) aumentou com o aumento da temperatura de secagem em todos os modelos matemáticos analisados, sendo seus valores positivos para toda faixa de temperatura estudada, caracterizando uma reação endergônica e o modelo matemático de Page obteve os maiores valores de energia livre de Gibbs. Segundo TELIS *et al.* (2000), quando os valores da energia livre de Gibbs forem negativos o processo é considerado espontâneo (que não requer acréscimo de energia do meio para que ocorra o processo), caso os valores forem positivos o processo é caracterizado como não espontâneo, sendo então o processo de secagem da castanha de caju considerado como não espontâneo.

De forma geral, analisando as propriedades termodinâmicas na secagem da castanha de caju nas temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C, observou-se que entropia compreendida entre -236,408 e - 190,652. mol⁻¹.K⁻¹, Page e Fick respectivamente, sendo observada redução dessa propriedade à medida que a temperatura foi aumentada. A energia livre de Gibbs aumentou com incrementos de temperatura, com valores passando de 87545,452 a 107422,171 J.mol⁻¹, para os modelo de Page e Fick respectivamente, para a faixa de temperatura investigada.

São encontrados valores de propriedades termodinâmicas para diversos produtos agrícolas na literatura (ALMEIDA et al., ALVES et al., 2021, SILVA et al., 2020, FERREIRA JUNIOR 2021; OLIVEIRA et al., 2020; SILVA et al., 2020).

4.3 Desenvolvimento do despeliculador

O equipamento denominado despeliculador foi desenvolvido para despelicular amêndoas de castanha de caju após etapa de torra no fluxograma de processo de beneficiamento da castanha de caju, conforme apresentado na Figura 25.



Figura 25 - Maquinário desenvolvido: despeliculador

Ele é constituído por uma base que acomoda a maior parte do sistema funcional do equipamento, sendo que um deles é um motor de corrente contínua, responsável por rotacionar o disco de cerdas de nylon posicionado acima da base e responsável pela despeliculagem. Ainda, responsável por esse processo tem um disco superior, também com cerdas de nylon entufadas em uma base de material pvc. Esse disco superior rotaciona no sentido contrário ao disco inferior, acionado por um motor também de corrente contínua, que está acomodado no compartimento superior do equipamento.

Parâmetros como altura entre os discos, tempo de funcionamento e potência do motor são controlados no painel frontal. A haste posterior é responsável pelo ajuste e suporte do sistema funcional superior, e o anel de inox funciona como um reservatório para acomodação das amêndoas.

Na Figura 26 e Tabela 14 encontram-se os detalhes do sistema funcional do equipamento desenvolvido.

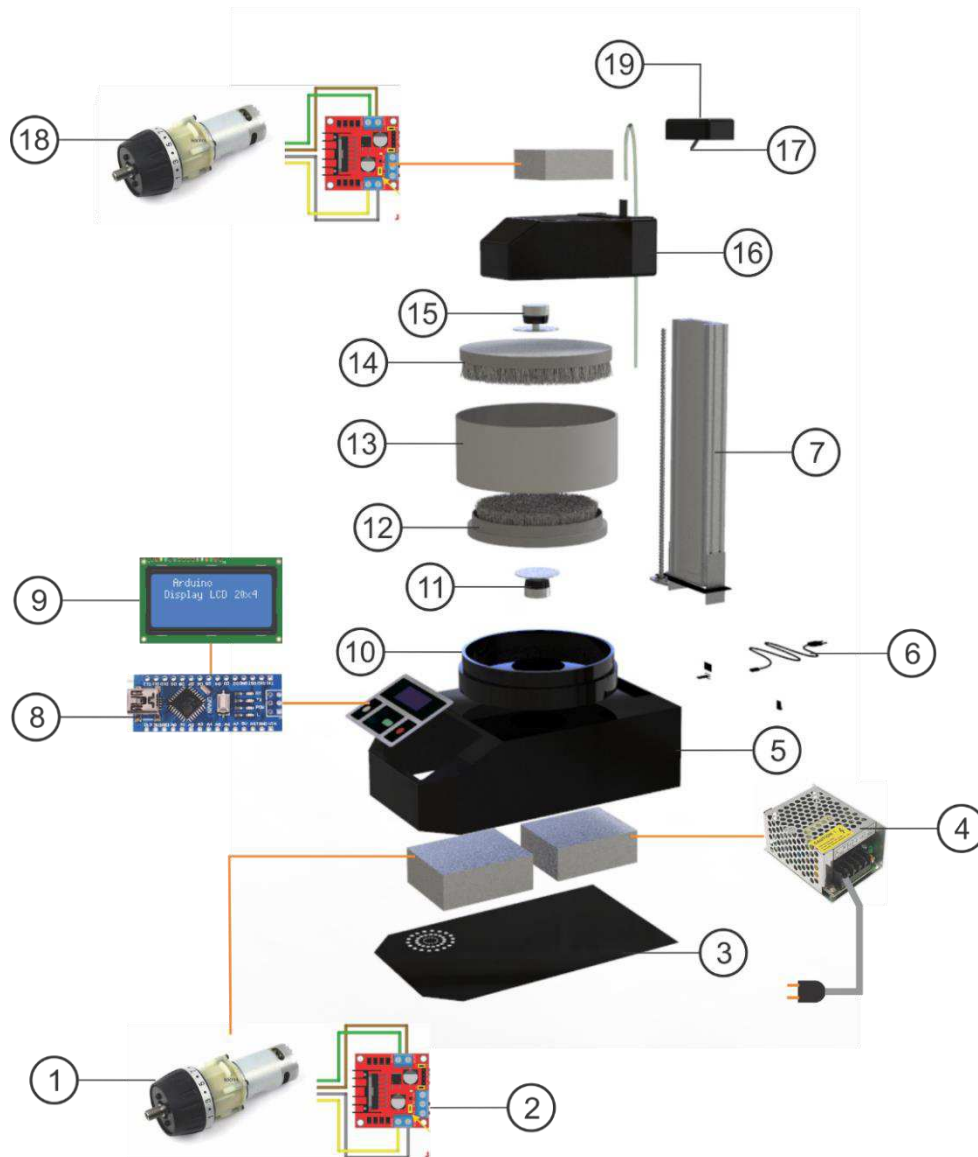


Figura 26 - Perspectiva explodida de partes e componentes do despeliculador

Tabela 14 - Partes de componentes do despeliculador de amêndoas de castanha de caju, desenvolvido nesta pesquisa.

Item	Descrição	Função
1	Motor de rotação contínua inferior	Rotacionar o disco de cerdas de nylon inferior
2	Sistema elétrico para motor	Funcionamento do motor
3	Carenagem inferior da base	Acomodar o sistema funcional inferior
4	Motor de elevação	Ajustar a distância entre os discos, tanto no funcionamento quanto na alimentação do produto
5	Carenagem da base	Acomodar o sistema funcional da base
6	Botão liga/desliga e cabo	Ligar e desligar o equipamento
7	Haste posterior	Suporte para ajuste de altura do disco
8	Sistema painel	Programar as configurações do equipamento
9	Tela	Exibir as configurações
10	Anel de estrutura	Acomodar os resíduos das castanhas despeliculadas e encaixar o reservatório (13)
11	Pino giratório inferior	Conectar o motor com o disco superior
12	Disco com cerdas de nylon inferior	Rotacionar e despelicular as castanhas por atrito
13	Reservatório	Acomodar as castanhas entre os discos
14	Disco com cerdas de nylon superior	Rotacionar e despelicular as castanhas por atrito
15	Pino giratório superior	Conectar o motor com o disco superior
16	Carenagem superior	Acomodar o sistema funcional superior
17	Sensor	Regular a movimentação do disco superior
18	Motor de rotação contínua superior	Rotacionar o disco de cerdas de nylon superior
19	Carenagem posterior	Acomodar o sistema funcional posterior
Sistema de fixação por parafusos e encaixes		

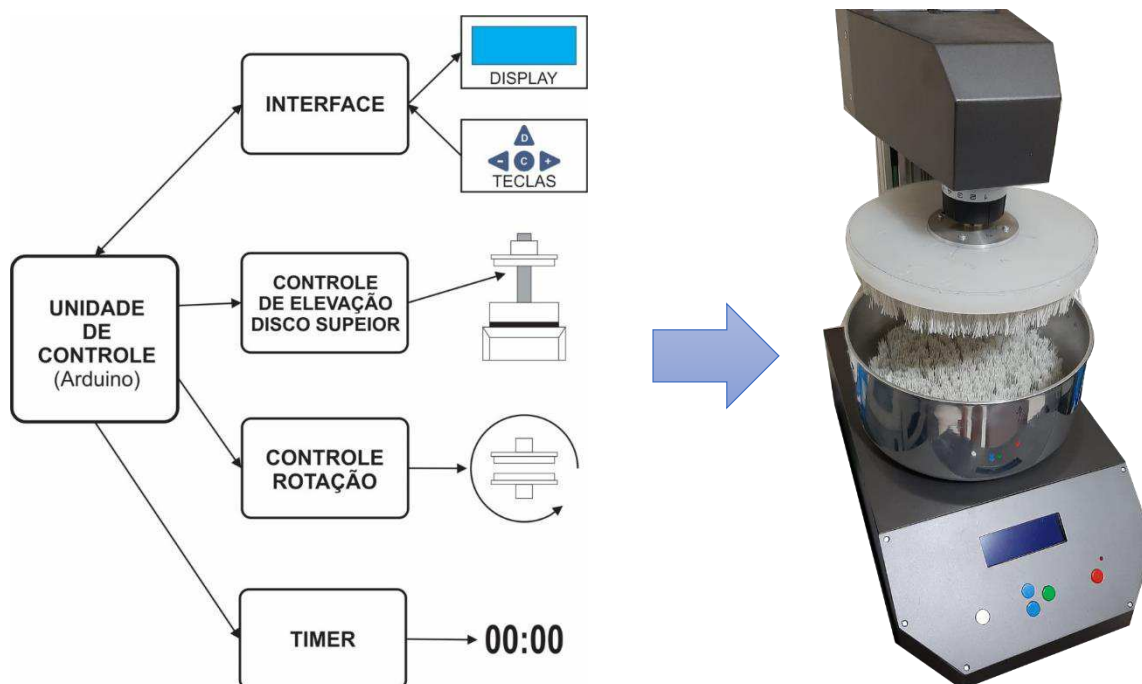


Figura 27 - Explicação do sistema funcional do despeliculador

1 – UNIDADE DE CONTROLE: Responsável pela automação lógica de todo processo operacional do equipamento despeliculador, sendo implementado por um microcontrolador Atmel (Arduino Nano), que possibilita através dos seus pinos digitais, de entrada e saída, o controle dos circuitos de interface, controle de elevação do disco superior, controle de velocidade de rotação e do timer.

2 – INTERFACE: Responsável pela interface homem máquina do equipamento, sendo composta por um display LCD 20x4 (20 colunas por 4 linhas) com backlight na cor azul e caracteres na cor branca, e um conjunto de 5 teclas com funções pré-definidas como reset, mais (+), menos (-), confirma e iniciar, possibilitando ao operador a seleção dos parâmetros desejados no processo de despeliculagem.

3 - CONTROLE DE ELEVAÇÃO DO DISCO SUPERIOR: Responsável pela movimentação e elevação do disco superior do equipamento, que possibilita a alimentação do reservatório inferior com as castanhas a serem despeliculadas, como também, a escolha de 4 possíveis níveis de pressão exercidas pelos discos superior e inferior, através da variação da distância entre os referidos

discos. A automação da elevação do disco superior foi implementada utilizando um driver comercial para arduino (L298n) e um motor de passos Nema 17, que juntamente com um fuso roscado de 8 mm possibilita o controle da elevação do disco superior do equipamento, conforme o tamanho da amêndoa.

4 – CONTROLE DE ROTAÇÃO: Responsável pelo controle da rotação dos discos superior e inferior, sendo possível a variação da velocidade de rotação de 100 a 400rpm, com incrementos pré-estabelecidos de 20 em 20 rpm. O circuito de controle de rotação foi implementado através de uma fonte de tensão variável, utilizando um circuito integrado LM317 em conjunto com um transistor NPN TIP35, tendo a sua tensão ajustada através de um potenciômetro digital X9C103 controlado pela unidade de controle, sendo estabelecido um nível de tensão para cada nível de rotação dos motores acoplados aos discos de sedas.

5 – TIMER: Responsável pelo controle do tempo de realização do processo de despeliculagem das castanhas, sendo possível seleção de tempos entre 1 a 5 minutos.

Ainda como instrumento de apresentação de detalhamento do equipamento, desenvolvido e testado nessa pesquisa, para o processo de despeliculagem da amêndoa da castanha de caju, segue o esquema explicativo com as conexões entre os sistemas funcionais internos do equipamento desenvolvido (Figura 28).

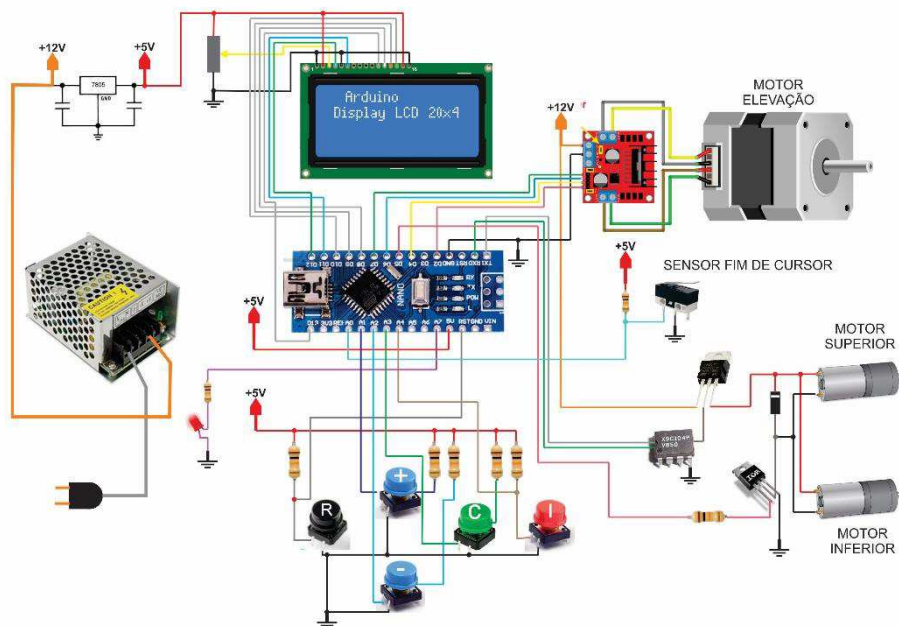


Figura 28 - Esquema com partes e componentes elétricos do maquinário

4.4 Despeliculagem das castanhas

Após o desenvolvimento e teste do equipamento denominado despeliculador, foi possível seguir para etapa de despeliculagem das amêndoas torradas nas diversas temperaturas.

Neste trabalho, a despeliculagem das amêndoas, ou seja, a retirada do pergaminho que a envolve, diferentemente do que ocorre nas indústrias de beneficiamento, foi feita após a etapa de torra, que nesta pesquisa correspondeu a secagem em elevadas temperaturas e velocidade do ar. Verificou-se após testes preliminares que após a fritura o pergaminho apresenta uma certa facilidade de remoção, mesmo sem realização das fases prévias de umidificação (etapa 1) e fricção (etapa 2) presentes no fluxograma do item 4.3.6, podendo serem eliminadas se for feita a opção pelo uso do equipamento desenvolvido, o despeliculador.

O equipamento foi construído e testado, visando validar a metodologia proposta para retirada do pergaminho da amêndoa da castanha de caju por atrito em cerdas de nylon, rotacionadas por meio de um motor. Antes de realizar os

experimentos com as amêndoas, diversos parâmetros foram testados como forma de realizar um estudo piloto.

Foi possível observar que o maquinário desenvolvido possuía diversas possibilidades de configurações, que podiam variar desde ajuste da altura dos discos com cerdas de nylon, de acordo com os tamanhos das castanhas, possibilidade de rotação dos motores superiores e inferiores e tempo de funcionamento, ou seja, permanência das amêndoas no processo de despeliculagem. Diante dessas possibilidades, foram estabelecidos alguns parâmetros definidos como os de melhor comportamento, especificamente neste estudo com amêndoas tipo SLW2 e LW1, quais sejam:

- Rotação → 260rpm (rotações por minuto);
- Altura entre os discos → nível 15 mm (distância entre os discos)
- Tempo de permanência → 30, 60 e 90 segundos

Dessa forma os experimentos definidos após os parâmetros testados e fixados estão descritos na Tabela 13 em que a temperatura refere-se ao tratamento de torra da amêndoa, na fase de secagem.

Tabela 13 - Parâmetros utilizados para o experimento de despeliculagem

Temperaturas de secagem da amêndoa (°C)	Rotação (rpm)	Altura entre os discos (mm)	Tempo de permanência (s)
120°C	260	15	30, 60 e 90
140°C	260	15	30, 60 e 90
160°C	260	15	30, 60 e 90
180°C	260	15	30, 60 e 90

Totalizando assim, 12 variações dos experimentos (4 temperaturas de secagem x 3 períodos de permanência), com 3 repetições, em que cada amostra continha 40 amêndoas íntegras.

Após os experimentos realizados, foi feita uma classificação das amêndoas quanto ao índice de quebra, relacionando-as com o sistema de

categorização conforme a FAO (2005), CACEX (2003) e o índice de despeliculagem, conforme escalas apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Escalas de classificação das amêndoas

Índice de quebra	Correspondência ao FAO e CACEX	Índice de despeliculagem	Correspondência aos FAO e CACEX
Totalmente inteira	SLW2 e LW1	Totalmente com película	100% com película
Pouco quebrada	S1 e S2	Maior parte com película	75% com película
Metade quebrada	B1 e B2	Metade da película	50% com película
Muito quebrada	P1 e P2	Menor parte com película	25% com película
Totalmente quebrada	SP1 e SP2	Sem película	0% com película

Após a realização dos experimentos, as análises de índice de quebra das amêndoas de castanha de caju foram realizadas, com intuito de verificar as quantidades de amêndoas inteiras e quebradas, após o tratamento de torra nas diferentes temperaturas de secagem, com diferentes períodos de permanência no despeliculador, bem como a interação entre esses fatores.

4.4.1 Índice de quebra das amêndoas

Nas Figuras 29, 30 e 31 são apresentados, respectivamente, os valores dos índices de quebras das amêndoas quando submetidas a 120, 140, 160 e 180 °C, e tempos de permanência de despeliculagem correspondentes à 30, 60 e 90 segundos.

Índice de quebra à 120°C

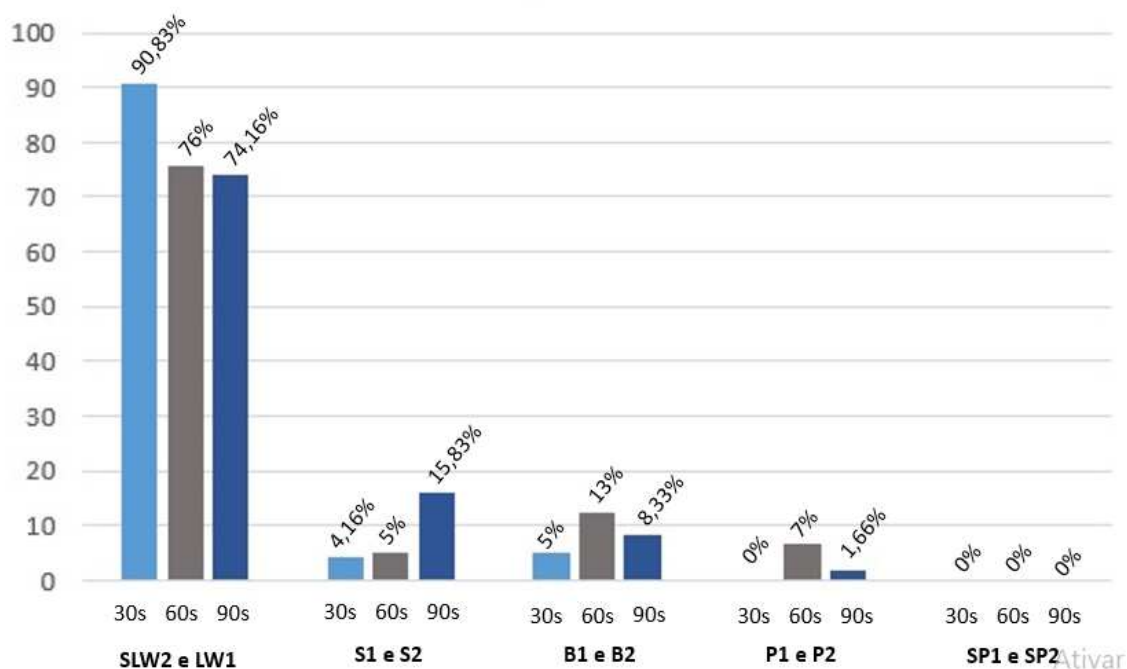


Figura 29 - Índices de quebra de amêndoas de castanha de caju, para a temperatura de torra de 120°C, classificadas conforme a FAO (2005) e CACEX (2003).

Analisando a Figura 29 foi possível perceber que para as amêndoas que foram submetidas à torra de 120°C e posteriormente despeliculadas, obteve-se um pequeno índice de amêndoas quebradas: totalmente quebrada (SP1 e SP2) de 0% e amêndoas parcialmente quebradas (B1 e B2) esse índice foi 8,7%. Observou-se para esse experimento um alto percentual de amêndoas inteiras (SLW2 e LW1), sendo 90,83% para o tempo de permanência de 30 segundos, 76% para 60 segundos e 4,16% para 90 segundos, caracterizando assim um bom desempenho do equipamento com relação ao índice de quebra nessa temperatura específica.

Índice de quebra à 140°C

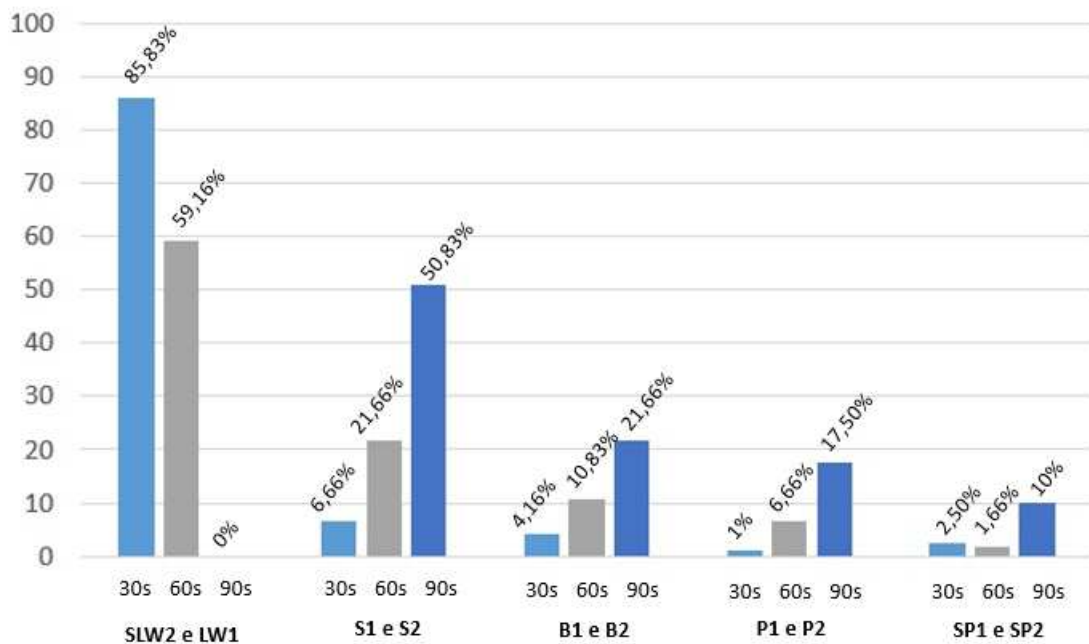


Figura 30 - Índices de quebra de amêndoas de castanha de caju, para a temperatura de torra de 140°C, classificadas conforme a FAO (2005) e CACEX (2003).

Na Figura 30 foi possível observar que para a temperatura de 140°C o índice de amêndoas totalmente quebradas (SP1 e SP2) foi, predominantemente, pequeno, sendo 2,5% para o tempo de despêliculagem de 30 segundos; 1,66% e 10% para 60 e 90 segundos, respectivamente. Ainda é possível observar que no tempo de 90 segundos de permanência no equipamento, para todas as classificações, o índice que quebra é maior, uma vez que as amêndoas são submetidas ao atrito por mais tempo, argumento comprovado pelo alto índice de amêndoas inteiras (SLW2 e LW1) no tempo de 30 segundos, que foi 85,83%, caracterizando assim, o melhor tempo de permanência, com vistas a minimizar o índice de quebra, para essa temperatura de torra.

Índice de quebra à 160°C

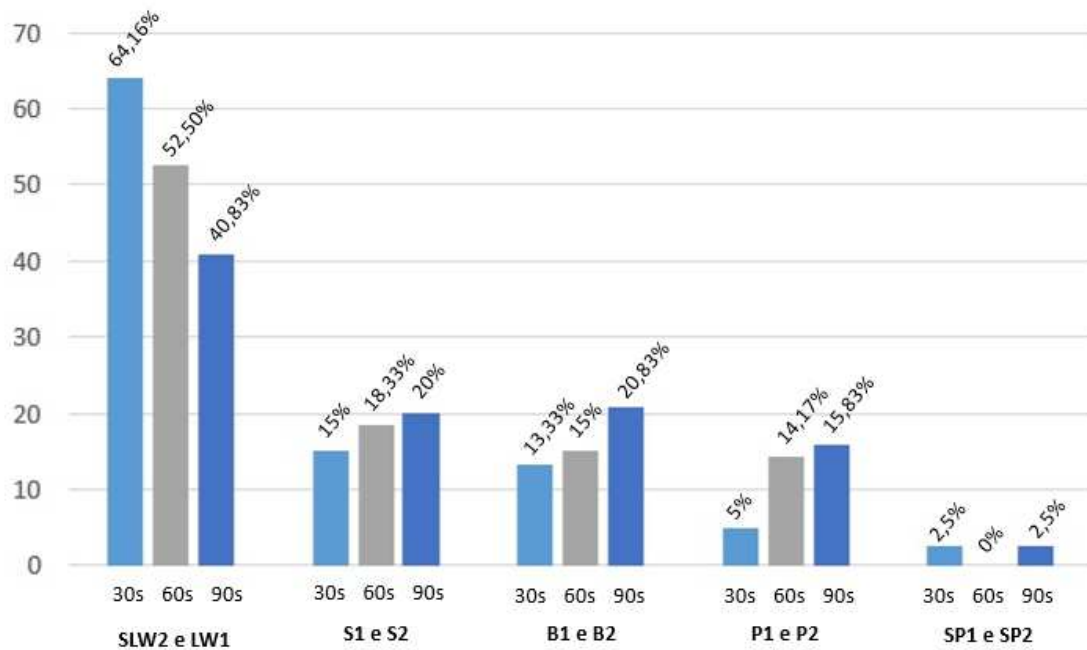


Figura 31 - Índices de quebra de amêndoas de castanha de caju, para a temperatura de torra de 160°C, classificadas conforme a FAO (2005) e CACEX (2003)

Ao analisar a Figura 31 constata-se uma maior variação de índice de quebra das amêndoas secas à temperatura de 160 °C, ou seja, foram observadas mais categorias de quebra, quando comparadas com as amêndoas secas às temperaturas de 120 e 140 °C. Nesta temperatura foi possível perceber que o índice de castanha SLW2 e LW1 (inteiras) foi satisfatório, quando submetidas ao tempo de 30 segundos, com 64,16%; os índices de quebra para 60 e 90 segundos, somaram 47,5% na categoria S1 e S2 (castanhas 75% íntegras) e 56,66% na categoria P1 e P2 (castanhas 25% íntegras).

Índice de quebra à 180°C

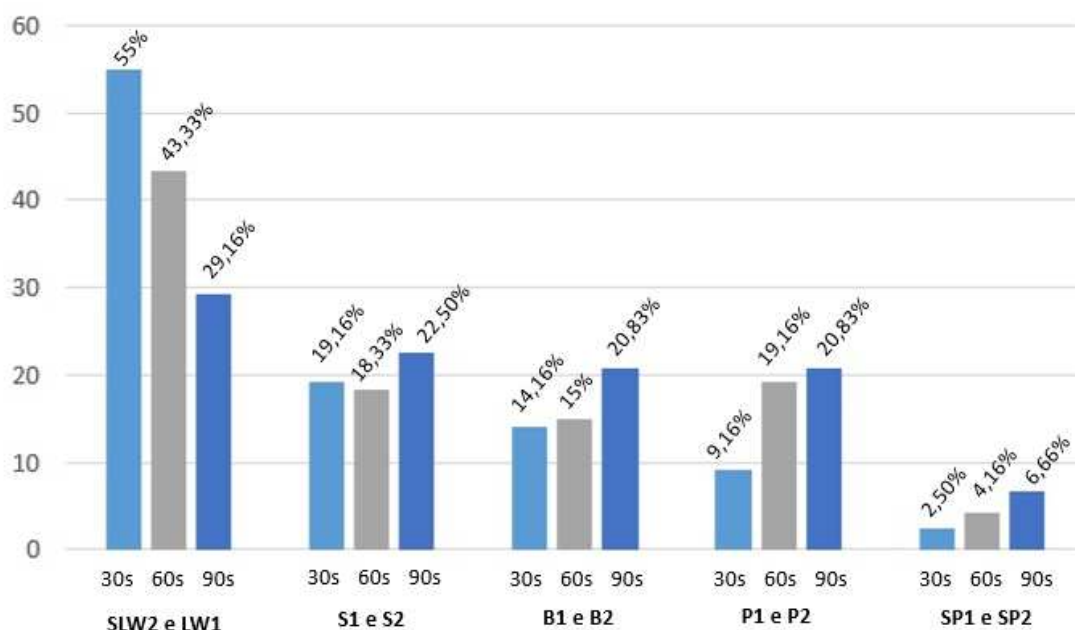


Figura 32 - Índices de quebra de amêndoas de castanha de caju, para a temperatura de torra de 180°C, classificadas conforme a FAO (2005) e CACEX (2003).

Na análise do parâmetro índice de quebra, na Figura 32, encontram-se os dados das castanhas que foram submetidas à torra nas condições de 180°C. Nessas condições, foi possível observar que o índice de amêndoas inteiras foi menor em todos os tempos de permanência, quando comparados às temperaturas anteriores de 120, 140 e 160°C. Observa-se que o índice de castanhas inteiras, categorias SLW2 e LW1, variou entre 55% e 29,16% para o tempo de 30 e 90 segundos, respectivamente, assim o tempo de 30 segundos foi o que gerou o maior número de amêndoas íntegras. Já no tempo de 90 segundos o índice de inteiras foi baixo, correspondendo a 29,16%, e as amêndoas quebradas ainda nesse tempo de permanência, somaram o índice de 70,82%.

Em se tratando de exportação desse produto, o maior interesse é a obtenção de amêndoas inteiras. Dessa forma, um beneficiamento onde se obtenha um maior percentual de inteiras, pode significar um aumento de exportação, com ganho significativo na balança comercial e por conseguinte, de produtividade, sem aumento de área plantada.

Assim, com intuito de se analisar o processo de despelliculagem sugerido nesta pesquisa, e sua eficiência de beneficiamento na produção de amêndoas inteiras, foi feita uma análise de variância, onde estudou-se a influência da Temperatura de Secagem (120, 140, 160 e 180 °C) versus Período de Permanência no Despeliculador (30, 60 e 90s), com 3 repetições, como também a interação entre esses dois fatores, sobre os valores médios resultantes de amêndoas inteiras. Para isto foi utilizando o programa computacional ASSISTAT versão 7.2 beta (SILVA & AZEVEDO, 2016)

Tabela 15 - Quadro de análise de variância dos valores médios de índice quebra de amêndoas de castanha quando submetidas a diferentes Temperaturas de Secagem e diferentes períodos de Tempo de Permanência no despeliculador.

Quadro de análise				
FV	GL	SQ	QM	F
Temperatura de Secagem (F1)	3	7657,06475	2552,35492	13,1775**
Tempo de Permanência (F2)	2	3926,74926	1963,37463	10,1367**
Interação. Temperatura (F1) x Tempo (F2)	6	355,28104	59,21351	0,3057ns
Tratamentos	11	11939,09505	1085,37228	5,6037**
Resíduo	24	4648,559	193,68996	
Total	35	16587,65404		
** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)				
* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)				
ns não significativo (p >= .05)				

Verifica-se pela análise de variância, presente na Tabela 15, que há influência do fator Temperatura de Secagem e também do fator Tempo de Permanência no despeliculador, ambos ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey, porém a interação entre estes dois fatores não foi significativa.

Tabela 16 - Comparação entre as médias dos valores de amêndoas de castanha de caju inteiras(%), devido as Temperaturas de Secagem

Temperatura (°C)	Análise
120	80,49% a
140	64,69% ab
160	51,85% bc
180	41,48% c
DMS	18,09243
CV%	23,34

Ao se observar a Tabela 16, foi possível perceber que o maior índice de castanhas inteiras (SLW2 e LW1) foi encontrado na temperatura de 120°C, com 80,49% das amêndoas, porém não apresenta diferença significativa para o valor obtido à temperatura de 140°C, que foi 64,69%. Percebeu-se ainda que o menor índice de castanhas integras foi obtido na temperatura de 180°C, porém não foi estatisticamente diferente do valor à temperatura de 160°C, que foi 51,85% de amêndoas inteiras. Apesar de o estudo estatístico ter mostrado diferenças não significativas entre as temperaturas, devido ao alto DMS, do ponto de vista comercial tais diferenças são muito representativas.

Essa tecnologia ainda apresenta um índice de quebra menor do que no sistema mecanizado, atualmente utilizado, onde cerca de 25% das amêndoas são quebradas durante a etapa de processamento, restando 75% de amêndoas inteiras segundo Paiva (2016), enquanto nesse processo, proposto, o índice que castanhas integras supera os 80%.

Tabela 15 - Comparação entre as médias dos valores de amêndoas de castanha de caju inteiras (%), devido ao Tempo de permanência no despeliculador

Tempo (segundos)	Análise
30	73,52% a
60	57,04% b
90	48,33% b
DMS	14,18200
CV%	23,34

As médias seguidas pela mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

Pelos valores na Tabela 17 é possível constatar que o índice de amêndoas inteiras, obtidas no processo de beneficiamento, aumentou conforme o menor tempo de permanência das amêndoas no despeliculador, assim para o tempo de 30 segundos, cerca de 73,52% das castanhas permaneceram integras, enquanto para o tempo de 60 e 90 segundos, 57,04% e 48,33% das amêndoas, respectivamente, ficaram inteiras, não existindo diferença significativa entre elas.

4.4.2 Índice de despeliculagem das amêndoas

Outro parâmetro analisado na categorização das amêndoas, segundo a FAO (2005) e CACEX (2003) foi o índice de despeliculagem das amêndoas em função da temperatura de torra e tempo de permanência no despeliculador, conforme Figuras 33, 34, 35 e 36.

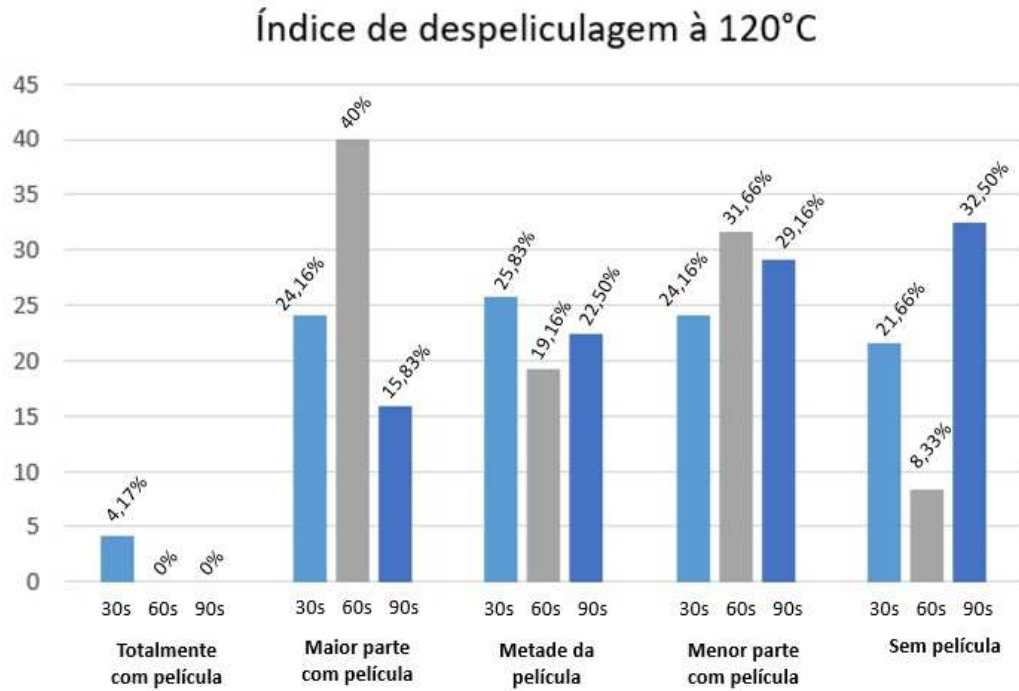


Figura 33 - Índices de amêndoas totalmente despeliculadas (%), para a temperatura de torra de 120°C; classificadas conforme a FAO (2005) e CACEX (2003).

Ao analisar a Figura 33, observa-se que o beneficiamento para temperatura de 120°C resultaram em valores percentuais próximos quanto ao nível de película nas amêndoas. É possível perceber que o tempo de processamento de 90 segundos foi o mais satisfatório para a despeliculagem completa de amêndoas, com 32,50% sem películas.

A Figura 34, a qual apresenta a despeliculagem das amêndoas em função da temperatura de 140°C.

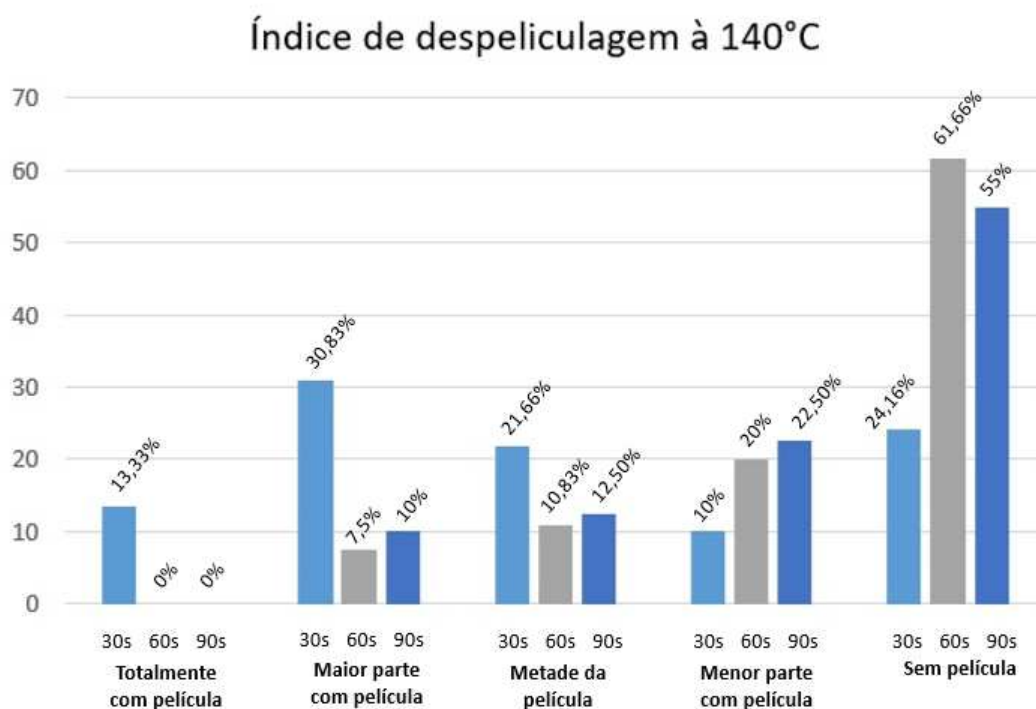


Figura 34 - Índices de amêndoas totalmente despeliculadas (%), para a temperatura de torra de 140°C; classificadas conforme a FAO (2005) e CACEX (2003)

Observa-se que para o tempo de 30 segundos o valor obtido para despeliculagem total das amêndoas não foi satisfatório, somando 65,82% de amêndoas com até metade da película. Para o tempo de permanência de 60 e 90 segundos, obteve-se melhores resultados de retirada da película da amêndoa, com 61,66% e 55% de amêndoas totalmente sem película.

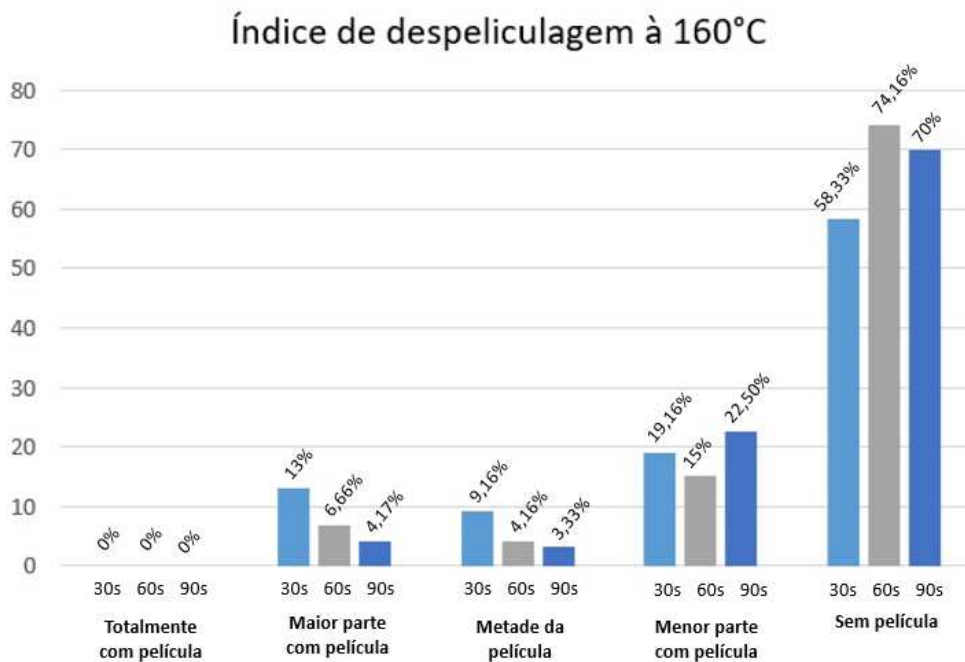


Figura 35 - Índices de amêndoas totalmente despeliculadas (%), para a temperatura de torra de 160°C; classificadas conforme a FAO (2005) e CACEX (2003)

Ao analisar a Figura 35, com índices que despeliculagem em função da temperatura de 160°C, percebe-se que o despeliculamento foi eficiente para os 3 períodos de tempo de permanência aos que as amêndoas foram submetidas. A maior quantidade de castanhas sem película foi observado no tempo de 60 segundos, com 74,16% das castanhas despeliculadas.

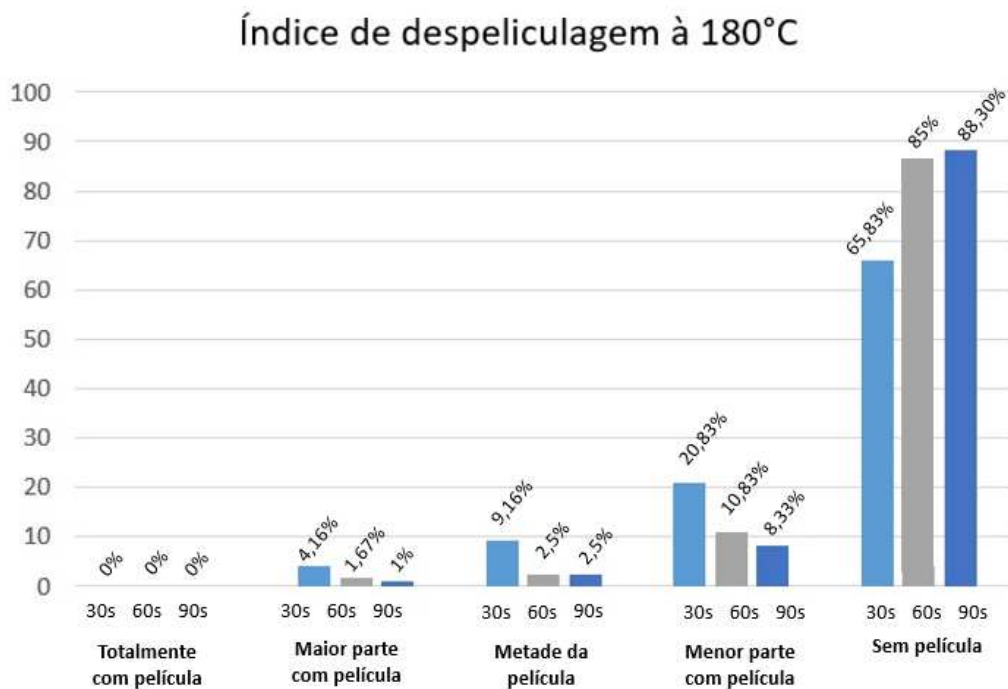


Figura 36 - Índices de amêndoas totalmente despeliculadas (%), para a temperatura de torra de 180°C; classificadas conforme a FAO (2005) e CACEX (2003).

A análise do parâmetro índice de despeliculagem, encontra-se ilustrado na Figura 36, onde são vistos os dados das amêndoas que foram submetidas à secagem na temperatura de 180°C, nela observa-se um grande índice de amêndoas despeliculadas, para os 3 tempos de permanência analisados, resultando em: 65,83% de para o período de permanência no equipamento de 30 segundos, 85% de amêndoas sem pele para tempo de permanência de 60 segundos e 88,30% de amêndoas despeliculadas para o tempo 90 segundos. Nesta temperatura constatou-se que nenhuma castanha ficou totalmente com película, e pequenas porcentagens apresentaram maior parte com película 4,16%; 1,67% e 1,00% para os tempos de 30, 60 e 90 segundos, respectivamente.

Ainda, com intuito de se analisar o processo de despeliculagem sugerido nesta pesquisa, e sua eficiência de beneficiamento na produção de amêndoas inteiras, foi feita uma análise de variância, onde estudou-se a influência da

Temperatura de Secagem (120, 140, 160 e 180 °C) versus Período de Permanência no Despeliculador (30, 60 e 90 s), com 3 repetições, como também a interação entre esses dois fatores, sobre os valores médios resultantes de amêndoas totalmente despeliculadas. Para isto foi utilizando o programa computacional ASSISTAT versão 7.2 beta (SILVA & AZEVEDO, 2016) Esta análise encontra-se na Tabela 18.

Tabela 18 - Quadro de análise de variância dos valores médios de índice de despeliculagem de amêndoas de castanha, quando submetidas a diferentes Temperaturas de Secagem e diferentes períodos de Tempo de Permanência no despeliculador.

Quadro de análise				
FV	GL	SQ	QM	F
Temperatura de Secagem (F1)	3	17999,86134	5999,95.378	53.6683 **
Tempo de Permanência (F2)	2	3135,25393	1567,62696	14.0221 **
Interação. Temperatura (F1) x Tempo (F2)	6	1253,22.371	208,87062	1.8683 ns
Tratamentos	11	22388,33.898	2035,30354	18.2054 **
Resíduo	24	2683,12.762	111,79698	
Total	35	25071,46660		
** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)				
* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)				
ns não significativo (p >= .05)				

Observa-se pela Tabela 19 que a interação entre os fatores de temperatura de torra e tempo de despeliculagem, para análise das amêndoas totalmente despeliculadas, não foi significativa, porém os fatores Temperatura de secagem e tempo de permanência apresentaram diferenças ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 19 – Comparação de médias com a interação entre temperatura e índice de despêliculagem

Temperatura	Análise
120°C	20,25% c
140°C	46,42% b
160°C	67,41% a
180°C	79,01% a
DMS	13.74
CV%	19.85
MG	53.27

As médias seguidas pela mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

Percebe-se pela Tabela 19 que quanto maior a temperatura de torra, maior o índice de despêliculagem da castanha do caju, sendo que as temperaturas de secagem de 160 e 180°C, com valores médios de amêndoas despêliculadas de, respectivamente, 67,41% e 79,01% não são estatisticamente diferentes entre si, ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Tabela 20 - Comparação entre as médias dos valores de amêndoas de castanha de caju totalmente despêliculadas (%), devido ao Tempo de permanência no despêliculador

Tempo (segundos)	Análise
30	40,18% b
60	58,33% a
90	61,29% a
DMS	10.77455
CV%	19.85
MG	53,26

As médias seguidas pela mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

Na Tabela 20 encontram-se os dados das médias das amêndoas que foram totalmente despêliculadas, com relação ao tempo de permanência delas no despêliculador. Observa-se, na Tabela 20, que o índice de castanhas despêliculadas, em função do tempo de permanência de 60 e 90 segundos, foi

e 58,33% e 61,29%, respectivamente, e que estes não são estatisticamente diferentes, ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey, enquanto o tempo de permanência de 30 segundos foi o que resultou em menor quantidade de amêndoas totalmente despelculadas.

4.5 Medidas físicas das amêndoas de castanha de caju após secagem e despelculagem

4.5.1 Teor de água

Ao final do beneficiamento as amêndoas apresentaram teor de água de médio de aproximadamente 4,5% b.u. que é, aproximadamente, o valor com o qual as amêndoas são comumente comercializadas, entre 4,0 e 5,5% b.u.

4.5.2 Medidas físicas das amêndoas pós- secagem

4.5.2.1 Tamanho das amêndoas

Na Tabela 21 estão os resultados obtidos das dimensões da amêndoa, com as medidas do comprimento, a; largura, b e espessura c, em milímetros, na condição *in natura* e após os tratamentos de secagem e despelculagem.

Tabela 21 - Comparações entre os valores médios dos diâmetros das Amêndoas de castanha de caju no *in natura*, e após cada etapa do beneficiamento proposto.

Amostras	a (mm)	b (mm)	c (mm)
<i>In natura</i>	30,914 a	20,995 a	13,721 a
120°C	31,285 a	20,733 a	14,728 a
140°C	31,725 a	20,635 a	13,686 a
160°C	33,058 a	21,360 a	13,215 a
180°C	28,684 a	21,253 a	13,420 a
DMS	8,280	2,481	2,212
CV%	9,170	5,410	7,360
MG	31,13	20,99	13,75

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

É possível observar que após a realização da secagem das amêndoas não foram detectadas diferenças significativas em nenhuma de suas dimensões, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Pelo fato do produto ser uma oleaginosa, com baixo teor de água, era de se esperar estes resultados, visto a pouca massa de água perdida e alto quantidade de óleo do produto.

4.5.2.2 Massa, volume, massa específica real e aparente e porosidade

Na Tabela 22 encontram-se os resultados da massa, volume, massa específica real, massa específica aparente, volume e porosidade da castanha de caju em função das temperaturas de secagem

Tabela 22- Comparações entre os valores médios da massa, volume, massa específica real, massa específica aparente e porosidade da amêndoa de castanha de caju.

Amostras	Massa (g)	Massa específica real (g.cm⁻³)	Massa específica aparente (g.cm⁻³)	Volume (cm³)	Porosidade (%)
<i>In natura</i>	3,534 ab ± 0,148	0,990 ab ± 0,0231	0,640 a ± 0,0058	3,586 ab ± 0,217	58.75 a ± 0,0095
120 °C	3,638 a ± 0,14	0,881 bc ± 0,026	0,4656 b ± 0,0129	4,138 a ± 0,262	58.00 ab ± 0,816
140 °C	3,958 ab ± 0,062	0,876 bc ± 0,101	0,444 c ± 0,0053	3,471a b ± 0,379	57.00 bc ± 0,816
160 °C	3,306 bc ± 0,115	0,849 c ± 0,012	0,446 c ± 0,0053	3,898 ab ± 0,180	55.75 c ± 0,5
180 °C	3,120 a ± 0,0749	0,851 c ± 0,029	0,436 c ± 0,0064	3,669 ab ± 0,1207	55.75 c ± 0,5
DMS	0,286	0,126	0,017	0,625	1.620
CV%	3,840	6,26	1,59	7,650	1.30
MG	3,41	0,918	0,486	3,738	57,05

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Com esses dados foi possível observar que, as médias referentes à massa individual para as amêndoas *in natura* e torradas, de modo geral, não diferiram entre si, exceto a massa das amêndoas secas a 160°C, porém essa diferença, provavelmente, se refere a variações entre amostras. Entretanto a massa específica real medida para as amêndoas secas, sob as quatro temperaturas de secagem, diferiram estatisticamente da média obtida para as amêndoas *in natura*. Os valores obtidos de massa específica real para as amêndoas secas foram próximos aos valores encontrados para outras amêndoas. Gharibzahedi et.al. (2010) encontraram valores de 1,071 g.cm⁻³ para o pinhão e Nogueira et. al. (2014) relataram valor de 0,947 g.cm⁻³ para a amêndoa da castanha-do-Brasil, Kross (2008).

Os dados de volume das amêndoas secas, ao serem comparados com o valor obtido para as amêndoas *in natura*, também se mantiveram sem diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade.

Quanto à porosidade, foi possível observar uma diminuição ao comparar as amêndoas *in natura* com as que passaram pelos tratamentos térmicos e de despeliculagem, o que se justifica pelo fato das amêndoas *in natura* serem integras, e as amêndoas que passaram pelo o processo de retirada do pergaminho tiveram determinados índices de quebradas e ausência do pergaminho.

4.5.2.3 Avaliação instrumental de crocância

Na Tabela 23 encontram-se os valores da análise instrumental de crocância das castanhas de caju *in natura*, secas e despeliculadas.

Tabela 23 - Comparação entre os valores médios da crocância da castanha do caju em função dos tratamentos de torra.

Amostras	Crocância (N)
<i>In natura</i>	15,489 d
120°C	20,585 c
140°C	22,513 c
160°C	27,425 b
180°C	32,762 a
DMS	3,401
CV%	5,330
MG	23,75

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade

Conforme apresentado na Tabela 23, a análise de regressão dos valores de crocância obtidos nos testes, em função da temperatura, evidencia a existência de uma correlação linear, estatisticamente significativa, ao nível de significância de $p, \leq 0,01$; assim, à medida em que se eleva a temperatura da torra, a crocância da amêndoa também é aumentada, entretanto os valores de crocância às temperaturas de 120 e 140°C, estatisticamente, não apresentaram diferenças entre si.

Segundo Chaunier (2005), a textura é um dos mais importantes atributos de produtos estudados, sendo a crocância o mais relacionado à determinação de qualidade do produto.

4.5.2.4 Cor das Amêndoas

Conforme proposto, foi realizado uma classificação de cor de amêndoas de castanha de caju, como apresentadas na Figura 37, com vistas a avaliar a qualidade do produto ao mercado interno e externo.

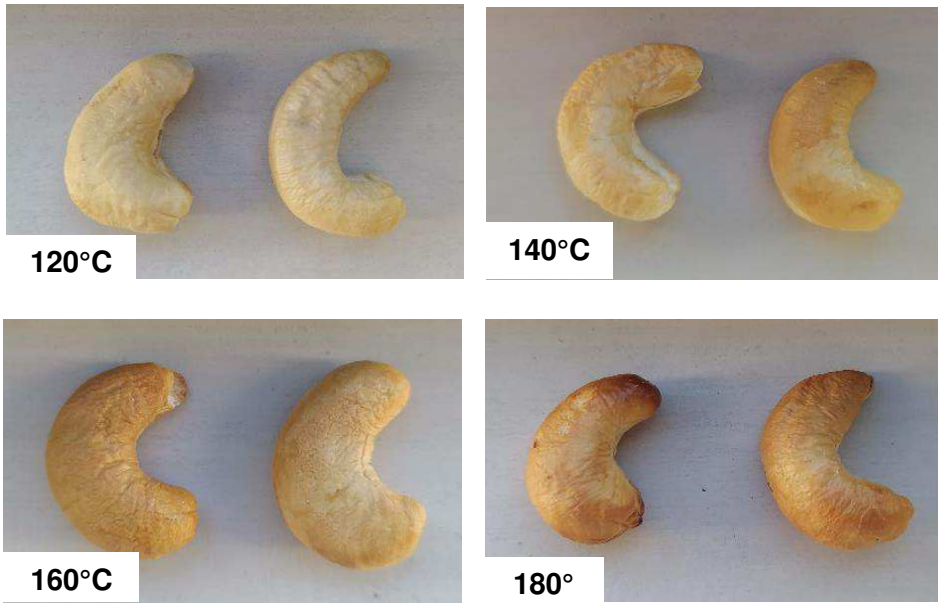


Figura 37 - Imagens das amêndoas de castanhas de caju submetidas às torras em diferentes temperaturas.

Os resultados obtidos para os parâmetros de cor (a^* , b^* e L^*) pelos métodos CIELAB e WHAT A COLOR das amêndoas de castanha de caju torradas a 120, 140, 160 e 180°C estão dispostos nas Tabelas 24.

Tabela 24 - Parâmetros de cor coletados nas castanhas por diferentes pontos de coleta na amêndo em função da temperatura.

Parâmetro		L		
Ponto de coleta	Centro	Extremidade grossa	Extremidade fina	
120°C	68,4675 ± 5,80	69,065 ± 9,38	61,8025 ± 1,75	
140°C	62,0525 ± 4,40	69,1225 ± 5,14	54,39 ± 6,42	
160°C	55,6925 ± 2,18	59,31 ± 5,54	54,6625 ± 4,51	
180°C	63,622 ± 5,30	49,47 ± 4,96	41,404 ± 4,27	

Parâmetro		a		
Ponto de coleta	Centro	Extremidade grossa	Extremidade fina	
120°C	0,88 ± 0,84	2,075 ± 1,88	2,1125 ± 0,59	
140°C	3,9575 ± 4,20	3,9425 ± 1,83	7,71 ± 3,46	
160°C	8,97 ± 2,93	12,1775 ± 6,33	10,16 ± 5,06	
180°C	10,25 ± 3,48	18,148 ± 1,19	18,374 ± 3,75	

Parâmetro		b		
Ponto de coleta	Centro	Extremidade grossa	Extremidade fina	
120°C	18,2075 ± 3,95	29,445 ± 5,55	20,7425 ± 4,18	
140°C	28,3 ± 12,10	33,745 ± 11,57	32,88 ± 7,23	
160°C	31,55 ± 1,96	36,755 ± 4,96	36,1225 ± 5,82	
180°C	34,526 ± 6,62	37,556 ± 5,57	27,422 ± 8,85	

Observa-se, pelos valores na Tabela 24, que a interação entre os fatores de temperatura de torra e pontos de captação de cor, para o parâmetro a, que mede a intensidade de vermelho, não foram significativas.

Tabela 25 - Quadro de análise de variância da temperatura de torra e captação de cor em três pontos da amêndoa para análise do parâmetro a.

Cor - Parâmetro a				
Quadro de Análise				
FV	GL	SQ	QM	F
Fator 1 (Temperatura)	3	1457,947	485,982	42,074**
Fator 2 (Centro/ Exp. Grossa/ Exp. Fina)	2	149,281	74,640	6,462**
Interação F1xF2	6	163,378	27,229	2,357ns
Tratamentos	11	1770,606	160,964	13,935**
Resíduos	36	415,825	11,551	
Total	47	2186,431		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$) ; * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$); ns não significativo ($p \geq .05$)

Observa-se, pelos valores contidos na Tabela 25, que a interação entre os fatores de temperatura de torra e pontos de captação de cor para o parâmetro “b”, que mede a intensidade de amarelo, assim como o “a” não foram significativas.

Tabela 26 - Quadro de análise de variância da temperatura de torra e captação de cor em três pontos da amêndoa para análise do parâmetro b.

Cor - Parâmetro b				
Quadro de Análise				
FV	GL	SQ	QM	F
Fator 1 (Temperatura)	3	975,295	325,098	6,374**
Fator 2 (Centro/ Exp. Grossa/ Exp. Fina)	2	350,296	175,148	3,434*
Interação F1xF2	6	424,197	70,700	1,386ns
Tratamentos	11	1749,788	159,071	3,119**
Resíduos	36	1836,249	51,007	
Total	47	3586,037		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$) ; * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$); ns não significativo ($p \geq .05$) .

Observa-se, pelos valores ilustrados na Tabela 26, que a interação entre os fatores de temperatura de torra e pontos de captação de cor para o parâmetro b, foi significativa com diferenças ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 27 - Quadro de análise de variância da temperatura de torra e captação de cor, em três pontos da amêndoa, para análise do parâmetro L.

Cor - Parâmetro L					
Quadro de Análise					
FV	GL	SQ	QM	F	
Fator 1 (Temperatura)	3	1683,657	561,219	19,534**	
Fator 2 (Centro/ Exp. Grossa/ Exp. Fina)	2	1028,386	514,193	17,897**	
Interação F1xF2	6	1029,069	171,511	5,970**	
Tratamentos	11	3741,112	340,101	11,838**	
Resíduos	36	1034,300	28,731		
Total	47	4775,412			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$) ;* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$);ns não significativo ($p \geq .05$)

Observa-se, pela Tabela 27, que a interação entre os fatores de temperatura de torra e pontos de captação de cor, para o parâmetro L, foi significativa com diferenças ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 28 - Quadro de análise de variância da temperatura de torra e captação de cor em três pontos da amêndoa para análise do parâmetro L.

Temperatura (°C)	Cor		
	Parâmetro L		
	Centro	Ext. Grossa	Ext. Fina
120	68,468aA	68,815aA	61,802aA
140	61,977abAB	68,872abA	54,390aB
160	55,692bA	59,310aB	54,663aA
180	65,365abA	48,045cB	38,928bB
DMS coluna	10.2020	10.2020	10.2020
DMS linha	9.2551	9.2551	9.2551
CV%	9.09	9.09	9.09
MG	58.94	58.94	58.94

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade

Conforme apresentado na Tabela 28, com a análise dos valores de intensidade de luz obtidos nos três pontos coletados, é possível observar que para a cor captada no centro e extremidades das amostras torradas à 120°C não foram detectadas diferenças significativas, o que indica uma uniformidade de cor na amêndoa.

Na análise feita para amêndoas torradas a 140°C, observa-se uma equivalência de cor entre o centro e a extremidade grossa; e também entre o centro e a extremidade fina, porém essa equivalência não ocorre entre a extremidade fina e a extremidade grossa.

O mesmo acontece nas castanhas torradas na temperatura de 160°C. Para as amêndoas torradas a 180°C, ocorreram diferenças significativas de cor entre as extremidades grossa e fina, e também em relação ao centro da amêndoa, o que indica uma cor de amêndoa desuniforme.

Por meio das análises estatísticas percebe-se um leve escurecimento da amêndoa quando torrada a temperatura mais elevadas. Conforme a escala de classificação CACEX (2003), a castanha torrada a 120°C é a mais clara, amarelo claro (8); a amêndoa torrada a à temperatura de 140°C é levemente escurecida,

denominada marfim pálido (7); a amêndoa torrada na temperatura de 160°C marfim forte (5) e a torrada à 180°C, escura, classificada como dourada (3).

5. CONCLUSÕES

Características físicas das amêndoas de castanha de caju *in natura*

- As amêndoas de castanha de caju utilizadas nesta pesquisa, possuem comprimento, largura e espessura médios de 30,91; 20,99 e 13,72 mm, respectivamente. A Massa média 3,53 g; porosidade 58,75%; massa específica real igual a 0,990 g.cm⁻³; massa específica aparente 0,640 g.cm⁻³; resistência à penetração, crocância, de 15,49 N. Foram categorizadas, conforme normas da FAO (2005) e CACEX (2003), como sendo amêndoas de castanha de caju do tipo SLW2 e LW1.

Cinética de secagem às temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C

- Na torra das amêndoas, realizadas às temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C, e velocidade do ar de 3 m.s⁻¹, foi verificada a existência, em todas as temperaturas, de uma taxa constante de secagem, partindo de 18,63% b.u. até 15,63 %b.u. o que corresponde ao tempo de 570, 420, 210 e 90 segundos, respectivamente;

-Para a fase de secagem à taxa constante, os valores do coeficiente de transferência de massa convectivo global foram 0,01395; 0,01566; 0,01613 e 0,0202 para as temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C, respectivamente, de modo geral, aumentando com o aumento da temperatura;

- Na cinética, à taxa decrescente de secagem às temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C, com velocidade do ar 3m.s⁻¹, os modelos de Fick com 6 termos da série, considerando uma forma cilíndrica para amêndoa; Page, Cavalcanti-Mata e Henderson & Pabis, se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais. Obteve-se, segundo Fick, coeficiente de difusividade efetiva variando de 6,318 x 10⁻⁹ a 13,041x10⁻⁹ m²s⁻¹, para temperaturas de 120 a 180 °C, respectivamente; verificando-se aumento desse valor com o aumento da temperatura; Entre todos os modelos, os maiores coeficientes de determinação (R² > 99,2%) e menores valores de DQM foram observados para Equação de

Cavalcanti-Mata, classificando-a como a que apresentou melhor ajuste matemático.

- A energia de ativação encontrada para a amêndoa de castanha de caju foi de 15,86 kJ.mol⁻¹ pelo o modelo de Fick; 4,06 kJ.mol⁻¹ segundo o modelo de Page; 6,30 kJ.mol⁻¹ para o modelo de Cavalcanti-Mata e 14,27 kJ.mol⁻¹ para o modelo de Henderson & Pabis;
- A entalpia (ΔH) variou de 12590,47 a 12091,63 J.mol⁻¹, segundo Fick; 792,52 a -293,68 J.mol⁻¹ conforme Page; 3027,16 a 2528,32 J.mol⁻¹ segundo Cavalcanti-Mata e de 10996,741 para 10497,901 J.mol⁻¹ por Henderson & Pabis, respectivamente, para temperaturas variando de 120 a 180 °C, constatando-se que houve uma redução neste parâmetro termodinâmico à medida que a temperatura aumentou;
- A entropia (ΔS) variou de - 190,65 a -191,83 J.mol⁻¹K⁻¹, segundo Fick; -235,23 a -236,41 J.mol⁻¹K⁻¹ conforme Page; -219,52 a -220,70 J.mol⁻¹K⁻¹ segundo Cavalcanti Mata e de -208,55 para 209,73 J.mol⁻¹K⁻¹ por Henderson e Pabis, respectivamente, para temperaturas variando de 120 a 180 °C, constatando-se que este valor apresenta poucas variações com o aumento da temperatura;
- A Energia Livre Gibbs (ΔG) variou de 87545,45 a 99020,86 J.mol⁻¹, segundo Fick; de 93272,25 a 107422,17 J.mol⁻¹ conforme Page; de 89331,34 a 102538,79 J.mol⁻¹ segundo Cavalcanti-Mata e de 92987,95 para 105537,18 J.mol⁻¹ segundo Henderson & Pabis, respectivamente, para temperaturas variando de 120 a 180 °C, constatando-se que houve aumento neste parâmetro termodinâmico à medida que a temperatura aumentou.

Desenvolvimento do despeliculador

- O desenvolvimento do despeliculador destinado à indústria de beneficiamento de castanha de caju para despeliculagem da amêndoa foi satisfatório, com os testes de validação registrou-se redução do índice de quebras de amêndoas (20 %) em relação ao processo industrial mecanizado (25 a 30 %), também foi

registrado um índice de despeliculamento máximo, para a temperatura de 120 °C de 73,52 %, enquanto no processo utilizado atualmente na indústria mecanizada é 65 a 70 %.

Beneficiamento das amêndoas; torra e despeliculagem

- O melhor resultado, quanto ao índice de quebra, foi obtido para castanhas torradas a 120 e 140°C, submetidas ao atrito das cerdas de nylon por 30 segundos, com porcentagem superior a 90 % de eficácia, número superior ao sistema mecanizado que tem um índice de quebra variando entre 65% a 70%;
- Para os dados de índice de despeliculagem das amêndoas, em função da temperatura e do tempo de permanência no despeliculador, o melhor resultado foi obtido para as castanhas torradas a 160 e 180 °C, submetidas ao atrito das cerdas de nylon por 60 segundos.
- As melhores condições de beneficiamento, para um melhor rendimento de amêndoas inteira, perfeitamente despeliculadas e com a cor dentro dos padrões aceitáveis para exportação foram: amêndoas torradas a 140°C despeliculadas por 60 segundos no despeliculador desenvolvido nesta pesquisa.

Características físicas pós tratamento de torra e despeliculagem

- As características físicas de tamanho, massa, massa específica aparente e real, sofreram poucas ou nenhuma variação após o processo de secagem. Os valores médios das principais características físicas, após o beneficiamento foram: Massa 3,638g, 3,958g, 3,306g, e 3,120g; porosidade 58%, 57%, 55,75% e 55,75%; massa específica aparente 0,466g.cm⁻³, 0,444g.cm⁻³, 0,446 .cm⁻³, 0,436g.cm⁻³; resistência à penetração, crocância 20,585N, 22,513N, 27,425N, 32,762N respectivamente para temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C.

- A força de resistência à penetração, utilizada como parâmetro de crocância da amêndoa, aumentou de 20,585N para 32,762N quando a temperatura de secagem variou de 120 a 180 °C.
- A cor das amêndoas foram amarelo claro (8), marfim pálido (7), marfim forte (5) e dourada (3), respectivamente, para as temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J. P. P. de. **Caju: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2015.

ARAUJO WD, Goneli Ald, Corrêa PC, Hartmann Filho CP, Martins EAS, Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. *Rev. Ciênc. Agron*, v. 48, p. 448-457, 2017.

BRAINER, M. S. de C. P.; VIDAL, M. de F. **Cajucultura. Caderno Setoria ETENE**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 5, n.114, maio 2020.

BOTELHO, F. M., Hoscher, R. H., Hauth, M. R., & Botelho, S. D. C. C Cinética de secagem de grãos de soja: influência varietal. Embrapa Agrossilvipastoril-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2018.

BOTELHO, F. M; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; MARTINS, M. A.; MAGALHÃES, F. E. A.; CAMPOS, S. C. Periods of constant and falling-rate for infrared drying of carrot slices. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 15, nº 08 p. 845-852, 2011.

BRASIL. Portaria nº 51, de 06 de março de 2009. **Projeto de instrução normativa que estabelece o projeto de regulamento técnico da amêndoa de castanha de caju**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 de março de 2009, Seção 1, p. 5.

CACEX - Carteira do Comércio Exterior/Banco do Brasil S.A. - **Tipos exportáveis de amêndoas de castanha de caju**. CACEX/BB/Departamento Geral de Exportação. 3p. (s.n), mimeografado, 2003.

CHAUNIER, L. et al. **Physical and sensory evaluation of cornflakes crispness**. *Journal of Texture Studies*. v. 36 p. 93-118, 2005.

CÂMARA, C. R. S. **Indicadores de qualidade de amêndoas de castanha de caju em pedaços durante processo industrial**, 116p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza- CE. 2010.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO A. P.; GONELI, A. L. G.; BOTELHO, F. M. **Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) em camadas delgadas**. Engenharia Agrícola, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.

CARVALHO, D. J.; MORETTI, R. R.; COLODETTE, J. L.; BIZZO, W. A. **Assessment of the self-sustained energy generation of an integrated first and second generation ethanol production from sugarcane through the characterization of the hydrolysis process residues**. Energy Conversion and Management, v. 203, 2020.

CAVALCANTI, M. E. R. M.; DUARTE, M. E. M.; ALMEIDA, F. A. C. **Secagem de sementes**. In: ALMEIDA, F. A. C.; DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI, M. E. R. M. Tecnologia de armazenamento em sementes. Campina Grande, Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas da Universidade Federal de Campina Grande, 2006, 271-370p.

DUARTE, M. E. M.; Cavalcanti Mata, M. E. R. M.; Almeida, F. A. C.; **Características físicas de sementes**. In: Almeida, F. A. C.; Duarte, M. E. M.; Cavalcanti Mata, M. E. R. M. Tecnologia de Armazenagem em sementes, 1. ed. Campina Grande, PB: UFCG, 2006. cap.5, p.189-269.

DUARTE, M. E. M., CAVALCANTI, M. E. R. M., ARAÚJO, R. D. A., ALMEIDA, R. D., NÓBREGA, A. M. M. C., MELO, R. B. D. F., ... & de Sousa Nunes, L. (2020). **Coeficiente de difusividade efetivo e modelagem matemática da secagem de berinjela**. Brazilian Journal of Development, 6(7), 54117-54124.

FAO. FAOStat. Disponível em: <http://faostat.fao.org> . Acesso em: 28 jul. 2015.

FAO. **Food and agriculture organization of the united nations**. Commodities and trade technical paper. Small Island Developing States Agricultural Production and Trade, Preferences and Policy. Rome. 2005. 70p.

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Production. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 10 fev. 2020.

FREITAS, J. B.; NAVES, M. M. V. **Chemical composition of nuts and edible seeds and their relation to nutrition and health**. *Revista de Nutrição*, v. 23, n. 2, p. 269-279, 2010

IAL- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4 ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2008. 1018p

IBGE- **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Introdução. Comentários. Lavouras (em formato pdf). Resultados. Tabelas · Publicação Indicadores. 2016.

KROSS, R. K. **Processamento de amêndoas de castanha de caju: secagem, extração e estabilidade do azeite**. 2008. 99 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Programa de doutorado em Engenharia de Processos, CCT, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB. 2008.

LEDBETTER, C.A.; PALMQUIST D.E. **Degradation of almond pellicle color coordinates at different storage temperatures**. *Postharvest Biology and Technology*, Amsterdam, v. 40, n.3, p. 295-300, 2006.

Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Tabela 6588 - **Série histórica da estimativa anual da área plantada, área colhida, produção e rendimento médio dos produtos das lavouras**. Março/2020. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematicoda-producao-agricola.html?=&t=resultados>. Acesso em 17.abr.2020a.

MARTINS, J. J. A.; MARQUES, J. I.; SANTOS, D. C.; Rocha, A. P. T. **Modelagem matemática da secagem de cascas de mulungu**. *Bioscience Journal*, v.30, n.6, p.1652-1660, 2014.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant an animal materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1980. 742p.

NASCIMENTO, A. P. S. **Secagem convectiva e influência da temperatura nas propriedades físico-químicas das amêndoas de girassol comercial**. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 20, n. 3, p. 227-238, 2018.

NASCIMENTO, R. A., Costa, R. L. T., ANDRADE, E. L., SANTANA, E. B., COSTA, C. M. L., FARIA, L. J. G. **Secagem de castanha do Brasil (*Bertholletia Excelsa*): Cinética e contração volumétrica**. *Processos Químicos e Biotecnológicos em Foco -Volume 1* (pp.20-23) 2019.

NOGUEIRA, R. M.; **Secagem da Castanha do Brasil em condições de floresta e carbonização do resíduo do fruto da castanheira**. Tese. Viçosa, MG. 2011.

OLIVEIRA, Vitor Hugo de. *Cajucultura*. *Rev. Bras. Frutic.*, Jaboticabal , v. 30, n. 1, Mar. 2008 . Available from http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-29452008000100001&lng=en&nrm=iso > acesso em 28 de Julho de 2018.

PAIVA, F. F. de A.; SILVA NETO, R. M.; PESSOA. P. F. A . P.; LEITE, L. A. de S. **Processamento de Castanha de Caju**. Embrapa Informação Tecnológica. Brasília, DF 2006

PAULA PESSOA, P. F. A.; LIMA, A. C.; LEITE, L. A. S. **Classificação e seleção de matéria-prima: atividades vitais para alavancar a competitividade da cadeia produtiva da amêndoa de castanha de caju brasileira.** Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2003.

Pesquisa Agrícola Municipal. IBGE/PAM Disponível em: Acesso em: 12 fev. 2020.

PEIXOTO, D.O. **Elaboração de um creme de amêndoas de castanha de caju e otimização do tempo de tostagem da amêndoa.** 2003. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

QUEQUETO, W. D., SIQUEIRA, V. C., FERRANTI, L. F., SCHOENINGER, V., & Leite, R. A. **Cinética de secagem dos grãos de feijão cultivar IPR Tangará.** Energia Na Agricultura, V 32(4), P 408-415. (2017).

RABELO, R. F.; OLIVEIRA, B. F. H.; SANTOS, O. R.; FRANÇA, L. F.; CORRÊA, N. C. F. **Estudo da influência da cinética de secagem em amêndoas de andiroba (Carapa guianensis Aublet.) na qualidade de seu óleo.** XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 2016.

REIS, V. B. D. S. X., CAMPOS, A. J. D., ARAUJO, K. K. S., MELO, P. D. C., REIS, J. L. Avaliação de amêndoas de baru in natura armazenadas em diferentes embalagens. **Revista de Ciências Agrárias**, nº42 volume 2, 261-270, 2019.

Santos, D. D. C., Leite, D. D. D. F., Lisbôa, J. F., Ferreira, J. P. D. L., Santos, F. S. D., Lima, T. L. B. D., ... & Costa, T. N. D. **Modelagem e propriedades termodinâmicas da secagem de fatias de acuri.** Brazilian Journal of Food Technology, v. 22, 2019.

SILVA, V.M.A., ALMEIDA, R.L.J., SANTOS, N.C., MUNIZ, C.E.S., BARROS, E.R., MOREIRA, F.I.N., CABRAL, M.B., NASCIMENTO, A.R.B., & SOUZA, E.S. (2020). **Prediction of mathematical models on the drying kinetics of shelled walnuts (*Juglans regia* L.)**. Research, Society and Development, 9(7): 1-13, e522974390

SILVA, R. C., ARAÚJO, K. T. A., PEREIRA, J. C. A., AMADEU, L. T. S., dos REIS, C. G., LIMA, L. S. L., ... & da SILVA, W. P. (2020). **Chips de batata baroa obtidos por secagem convectiva**. Brazilian Journal of Development, 6(12), 102586-102598.

SOARES, D. J.; de SOUSA SABINO, L. B.; de SOUSA, M. S. M. L.; de CARVALHO MAGALHÃES, C. E.; ALMEIDA, M. M. B.; DE SOUSA, P. H. M.; de FIGUEIREDO, R. W. **Mineral content, based in the Recommended Daily Intake, in cashew nut obtained from conventional and organic cultivation in different stages of processing**. Semina: Ciências Agrárias, v. 33, n. 5, p. 1869-1876, 2012.

SOUSA, Ramon. Viana. DE. **Secagem de grãos de arroz vermelho em casca em camada fina e espessa: avaliação experimental, modelagem e simulação**. 2017 .212f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande, PB. 2017.

SOUSA, Ramon Viana de et al. **Secagem em camada fina e espessa de grãos de arroz vermelho em casca: avaliação experimental, modelagem e simulação**. 2017.

TEIXEIRA, P. C. M.; ZUNIGA, A. D. G.; RIBEIRO, L. **Modelagem matemática e cinética de secagem da amêndoa do baru (*Dipteryx alata* Vog.)**. Enciclopédia Biosfera, v.11, p.1309-1324, 2015.

TOURÉ, S.; Kibangu-Nkembo, S. Comparative study of natural solar drying of cassava, banana and mango. Renewable Energy, v.29, p.975-990, 2004.

VINACAS - Associação do Caju no Vietnã. **Previsão inesperada da indústria vietnamita do caju em uma conferência surpresa na Índia.** Disponível em: <http://www.vinacas.com.vn/du-doan-bat-ngo-ve-nganh-dieu-viet-tai-hoithao-dot-xuat-o-an-do-bv1486.htm>. Acesso em: 24 abr. 2020.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOSKOURIS, D. **Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs.** Drying Technology, New York, v.14, n.10, p. 2225-2253, 1996.

APÊNDICE A

Dados da despeliculagem e índice de quebra

Índice Película										
Temperatura de torra					120					
Tempo de permanência (s)		30			60			90		
Totalmente com película	6,67	2,22	20,00	2,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
75% com película	11,11	26,67	35,56	17,78	31,11	57,78	15,56	13,33	20,00	
50% com película	31,11	31,11	22,22	26,67	20,00	11,11	17,78	15,56	35,56	
25% de película	26,67	22,22	20,00	40,00	28,89	20,00	37,78	31,11	17,78	
sem película	24,44	17,78	2,22	13,33	20,00	11,11	28,89	37,78	26,67	
Temperatura de torra					140					
Tempo de permanência (s)		30			60			90		
Totalmente com película	22,22	8,89	6,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
75% com película	31,11	33,33	24,44	8,89	11,11	2,22	13,33	8,89	8,89	
50% com película	31,11	17,78	15,56	15,56	6,67	11,11	13,33	13,33	13,33	
25% de película	6,67	15,56	15,56	26,67	15,56	17,78	17,78	28,89	17,78	
sem película	6,67	24,44	37,78	48,89	66,67	68,89	55,56	48,89	60,00	
Temperatura de torra					160					
Tempo de permanência (s)		30			60			90		
Totalmente com película	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
75% com película	33,33	2,22	2,22	4,44	15,56	0,00	2,22	2,22	2,22	
50% com película	13,33	13,33	2,22	2,22	8,89	2,22	4,44	4,44	4,44	
25% de película	24,44	13,33	20,00	20,00	11,11	15,56	22,22	22,22	22,22	
sem película	28,89	71,11	73,33	73,33	64,44	82,22	71,11	71,11	71,11	
Temperatura de torra					180					
Tempo de permanência (s)		30			60			90		
Totalmente com película	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
75% com película	6,67	4,44	2,22	0,00	0,00	4,44	0,00	2,22	0,00	
50% com película	8,89	4,44	15,56	6,67	0,00	2,22	4,44	0,00	2,22	
25% de película	17,78	24,44	20,00	13,33	8,89	13,33	8,89	6,67	11,11	
sem película	66,67	66,67	62,22	80,00	91,11	80,00	86,67	91,11	86,67	

Indice de Quebra									
Temperatura de torra									
120									
Tempo de permanencia (s)									
	30			60			90		
Inteira 100%	93,33	95,56	82,22	80,00	91,11	57,78	88,89	84,44	51,11
Inteira 75%	4,44	0,00	13,33	2,22	2,22	11,11	4,44	11,11	31,11
Inteira 50%	2,22	4,44	4,44	8,89	6,67	20,00	4,44	4,44	15,56
Inteira 25%	0,00	0,00	0,00	8,89	0,00	11,11	2,22	0,00	2,22
Totalmente quebrada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Temperatura de torra									
140									
Tempo de permanencia (s)									
	30			60			90		
Inteira 100%	93,33	84,44	75,56	62,22	60,00	55,56	46,67	68,89	35,56
Inteira 75%	0,00	8,89	15,56	6,67	31,11	28,89	28,89	8,89	31,11
Inteira 50%	2,22	0,00	6,67	22,22	4,44	4,44	15,56	13,33	24,44
Inteira 25%	0,00	4,44	0,00	8,89	4,44	6,67	8,89	8,89	8,89
Totalmente quebrada	4,44	2,22	0,00	0,00	0,00	4,44	0,00	0,00	0,00
Temperatura de torra									
160									
Tempo de permanencia (s)									
	30			60			90		
Inteira 100%	84,44	53,33	55,56	62,22	64,44	26,67	53,33	46,67	20,00
Inteira 75%	2,22	22,22	20,00	2,22	20,00	33,33	0,00	31,11	31,11
Inteira 50%	6,67	17,78	15,56	11,11	6,67	26,67	20,00	15,56	26,67
Inteira 25%	6,67	4,44	4,44	22,22	11,11	13,33	26,67	6,67	15,56
Totalmente quebrada	0,00	2,22	4,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,67
Temperatura de torra									
180									
Tempo de permanencia (s)									
	30			60			90		
Inteira 100%	55,56	48,89	60,00	33,33	40,00	51,11	31,11	26,67	26,67
Inteira 75%	13,33	22,22	24,44	11,11	22,22	22,22	13,33	26,67	31,11
Inteira 50%	20,00	15,56	6,67	26,67	6,67	13,33	15,56	24,44	22,22
Inteira 25%	6,67	13,33	6,67	13,33	31,11	13,33	20,00	22,22	20,00
Totalmente quebrada	4,44	0,00	2,22	13,33	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00

APÊNDICE B1

Análise de variância da massa específica da castanha de caju

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	3	0,06956	0,02319	2,6572 ^{ns}
Resíduo	16	0,13962	0,00873	
Total	19	0,20918		

**** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$); ns não significativo ($p \geq .05$).
MG = 0,88590; CV% = 10,54.**

APÊNDICE B2

Análise de variância do volume por deslocamento da castanha de caju

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	3	0,45673	0,15224	0,7416 ^{ns}
Resíduo	16	3,28470	0,20529	
Total	19	3,74142		

**** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$); ns não significativo ($p \geq .05$).
MG = 3,84535; CV% = 11,78.**

APÊNDICE B3

Análise de variância do volume por deslocamento de fluido da amêndoa de caju

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	3	0,62041	0,20680	15,5279 ^{**}
Resíduo	16	0,21309	0,01332	
Total	19	0,83350		

**** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$); ns não significativo ($p \geq .05$).
MG = 3,36905; CV% = 3,43.**

APÊNDICE B4

Análise de variância do tamanho (a) da amêndoa de castanha de caju

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	40,48476	10,12119	0,7048 ^{ns}
Resíduo	15	215,41368	14,36091	
Total	19	255,89844		

**** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$); ns não significativo ($p \geq .05$). MG = 31,132314; CV% = 12,17.**

APÊNDICE B5

Análise de variância do tamanho (b) da amêndoa de castanha de caju

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1,59215	0,39804	0,3086 ^{ns}
Resíduo	15	19,34933	1,28996	
Total	19	20,94148		

**** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$); ns não significativo ($p \geq .05$). MG = 20,99490; CV% = 5,41.**

APÊNDICE B6

Análise de variância do tamanho (c) da amêndoa de castanha de caju

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	5,42234	1,35559	1,3225 ^{ns}
Resíduo	15	15,37472	1,02498	
Total	19	20,79707		

**** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$); ns não significativo ($p \geq .05$). MG = 13,75383; CV% = 7,36.**

APÊNDICE B7

Análise de variância do teor de água da amêndoa de castanha de caju

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	635,14913	158,78728	32016,0388**
Resíduo	15	0,07439	0,00496	
Total	19	635,22353		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$); ns não significativo ($p \geq .05$).
MG = 7,36317; CV% = 0,96.

APÊNDICE B8

Análise de variância da crocância da amêndoa de castanha de caju

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	523,52705	130,88176	81,5406**
Resíduo	10	16,05111	1,60511	
Total	14	539,57816		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$); ns não significativo ($p \geq .05$).
MG = 23,75580; CV% = 5,33.

APÊNDICE C

Gráfico da análise instrumental de textura (crocância) da amêndoa de castanha de caju

