

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA (PEQ – UFS)

CAMILA FELIX FERREIRA

**APLICAÇÃO DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICA
NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO PARA A SECAGEM
DE SEMENTES DE *Moringa oleifera* Lam**

SÃO CRISTÓVÃO (SE)

(2015)

CAMILA FELIX FERREIRA

**APLICAÇÃO DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICA
NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO PARA A SECAGEM
DE SEMENTES DE *Moringa oleifera* Lam.**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Química
como requisito parcial à obtenção do título
de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Manoel Marcelo do Prado, D.Sc.

SÃO CRISTÓVÃO (SE)

(2015)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

F383a Ferreira, Camila Felix
Aplicação de energia eletromagnética na região do infravermelho para a secagem de semente Moringa oleifera Lam / Camila Felix Ferreira; orientador Manoel Marcelo do Prado. – São Cristóvão, 2015.
121 f.: il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, 2015.

1. Engenharia química. 2. Ondas eletromagnéticas. 3. Moringa oleifera. 4. Secagem. 5. Transferência de massa. I. Prado, Manoel Marcelo do, orient. II. Título

CDU: 66.0: 582.683.4

CAMILA FELIX FERREIRA

APLICAÇÃO DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICA NA REGIÃO DO
INFRAVERMELHO PARA A SECAGEM DE SEMENTES DE *Moringa oleifera* Lam

Dissertação de Mestrado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química da Universidade Federal de Sergipe em 31 de julho de 2015.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado

Orientador (PEQ/UFS)

Prof^a Dr^a Luanda Gimeno Marques

(PEQ/UFS)

Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori

(PPG-EQ/UFSCar)

Aos meus pais Francisco e Elza,
meus irmãos Gaby e Bruno e meu marido Sávio Sayanne,
pelo amor, companheirismo, paciência e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, que me deu força em todos os momentos em que precisei de persistência e calma, por me guiar pelos caminhos e sempre estar ao meu lado nas horas difíceis.

Aos meus irmãos, Gaby e Bruno, que sempre estiveram do meu lado em todos os momentos da minha vida. Agradeço em especial aos meus pais, Francisco e Elza, por todo o incentivo, força, compreensão e dedicação em toda a minha vida. Sem vocês eu não seria nada. Muito obrigada por virem me salvar sempre que precisei. “Painho”, agradeço imensamente ao senhor por se dispor a procurar e mandar sementes de moringa certamente, este trabalho não teria existido sem sua ajuda.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado, pela oportunidade, de poder concretizar este trabalho, pela confiança, pela orientação, pelo incentivo e paciência com os meus erros.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química - UFS, que contribuíram para o meu conhecimento. Aos professores Antônio Martins, José Jailton e Luanda pelas correções e sugestões ao trabalho.

Aos colegas de turma, principalmente Samia, que ajudou a entender um pouco mais sobre a Engenharia Química, pelo material de grande utilidade e por me ajudar várias vezes que precisei.

Aos colegas do Laboratório de Fenômenos de Transporte Douglas, Tamiris e Rodolfo, por me ajudarem com os equipamentos, experimentos, nas horas em que tive dúvida e nos momentos de sufoco.

As minhas amigas Lih, Rafa e Joseane, que mesmo longe torcem por mim e sempre me motivam. Saudades de vocês!!

De forma especial ao meu marido Sávio Sayanne, que desde os primeiros momentos se mostrou companheiro, solidário e fiel, me auxiliando em todos os momentos, principalmente nas madrugadas no laboratório, na busca de sementes e também com os problemas do computador. Muito obrigada por me incentivar e não me deixar desistir, quando estava desanimada e desesperada. Muito obrigada por trazer Heejun para aliviar minha dor e meu choro, quando Pretinha se foi.

Preta, agradeço a Deus por te levar a nossa família, só Ele sabe o quanto a sua presença mudou minha vida, o meu jeito de pensar e de agir. Foi através de você que me

descobri, agora sei o que realmente quero para mim e o que me faz feliz. Muito obrigada por me fazer rir, me fazer companhia e me sentir mais amada quando fui à Paraíba. Sua jornada foi muito curta, mas você será inesquecível.

Enfim, quero agradecer a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, participaram na produção deste trabalho e fazem minha vida mais feliz, o meu sincero respeito e gratidão.

Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito.

Não sou o que deveria ser,
mas Graças a Deus, não sou o que era antes.

(Marthin Luther King)

RESUMO

As sementes de moringa (*Moringa oleifera*) vêm ganhando destaque devido ao grande potencial de aplicação no tratamento de água como coagulante natural e para a produção de biodiesel, devido à elevada qualidade de seu óleo. Entretanto, essas sementes possuem também um alto teor de umidade, necessitando serem submetidas a um processo de secagem. Visando contribuir para o P, D & I de secadores com menor custo energético para esta espécie de semente, este trabalho teve como objetivo geral avaliar o uso da radiação eletromagnética na região do infravermelho (IV) para a secagem de sementes de *Moringa oleifera* Lam, através de um estudo experimental envolvendo a determinação da cinética de secagem, a caracterização do encolhimento das partículas, a avaliação do consumo de energia do processo e da influência da intensidade de radiação IV sobre atributos de qualidade do produto. Os experimentos de secagem foram conduzidos com temperaturas da fonte de aquecimento IV de 90, 120 e 160°C. Análise de imagens foi utilizada para investigar o encolhimento das partículas durante o processo. A secagem IV de sementes de moringa em camada fina foi acompanhada por reduções de volume e de área superficial das partículas, as quais mostraram-se dependentes apenas do adimensional de umidade e da estrutura da semente (com e sem tegumento). O comportamento de secagem do material foi caracterizado pela presença de três períodos: de aquecimento, de fluxo de umidade constante e de fluxo decrescente. O período de fluxo decrescente predominou em toda a faixa de temperaturas, indicando que as resistências internas à transferência de massa governam o processo de secagem. Negligenciar o encolhimento das sementes sem tegumento abreviou erroneamente o período de fluxo constante, levando a uma superestimação da difusividade efetiva e, conseqüentemente da transferência de massa por difusão. A presença do tegumento restringiu a contração de volume da partícula (10%), comparado aos 60% de encolhimento das sementes sem tegumento, favorecendo o desenvolvimento de uma estrutura interna porosa. Apesar do tegumento atuar como resistência à transferência de calor e massa, principalmente nos estágios iniciais de secagem, o tempo necessário para as sementes com tegumento atingirem a umidade alvo não foi significativamente diferente daquele observado para sementes sem tegumento. O consumo de energia específica ficou na faixa de 36,4 a 45,8 MJ kg⁻¹ água evaporada para sementes com tegumento, e na faixa de 38,7 a 46,5 MJ kg⁻¹ para sementes sem tegumento. Todas as amostras de moringa com e sem tegumento submetidas ao processo de secagem via radiação IV apresentaram viabilidade de germinação de acordo com o teste de tetrazólio. A avaliação da variação total de cor do produto indicou que as sementes ficaram mais suscetíveis à degradação dos seus constituintes e ao escurecimento após a remoção do tegumento, sendo recomendado que o material não atinja durante processos longos uma temperatura final superior a 40°C ou que seja submetido a condições de secagem rápida. A avaliação combinada dos aspectos relacionados à transferência de massa, consumo de energia específica e qualidade do produto indicou a temperatura de aquecimento IV de 160°C como a condição ótima para reduzir de forma rápida e eficiente a umidade para níveis considerados seguros para o armazenamento, preservando atributos de qualidade do produto. Com respeito à influência do tegumento, não é necessário descascar as sementes antes da secagem, o que implica numa economia de tempo, evitando também o custo adicional de uma etapa de pré-tratamento do material.

PALAVRAS-CHAVE: Secagem IV; Moringa; Encolhimento; Transferência de massa.

ABSTRACT

Moringa seeds (*Moringa oleifera*) have received special attention because of the potential to be applied as natural coagulant in water treatment, as well as source for biodiesel production, due to high quality of the oil contained within them. However, they also have high moisture content, requiring to be submitted to drying process. Aiming to contribute with P, D & I of energy saving dryers to this seed specie, this work had as main objective to evaluate the potential use of infrared radiation for drying seeds from *Moringa oleifera* Lam, through an experimental study involving the determination of drying kinetics, the shrinkage characterization, the evaluation of energy consumption as well as of the process effects on the product quality. Drying tests were performed at IR source temperatures of 90, 120 e 160°C. Image analysis was employed to quantify particles shrinkage during drying. IR drying of moringa seeds was accompanied by reductions of particles volume and surface area, which were found to be dependent only from dimensionless moisture and seed structure (with and without seed coat). The IR drying behavior of the material was characterized by the presence of three drying periods: heating up, constant moisture flux and falling moisture flux. This latter was predominant in all investigated conditions, indicating that diffusion controls the drying process. Neglecting shrinkage of kernel during IR drying led to an erroneous shortening of the constant flux period and overestimation of the mass transfer by diffusion. The shell that coats the seeds has limited the volume contraction of particle (10%), when compared to the shrinkage of unshelled seeds or kernels (60%), thus contributing to the development of a porous structure within the particle. Although the shell acts as a resistance to mass and heat transfer, mainly in initial stages of drying, the time required for the seed to reach the target moisture was not significantly different from that verified for the kernels. The specific energy consumption was in the range 36,4 a 45,8 MJ kg⁻¹ evaporated water for seeds with tegument and 38,7 a 46,5 MJ kg⁻¹ for seeds without tegument. All IR-dried samples presented physiological viability, according to tetrazolium test. The total changes in product color indicated that the seeds were more susceptible to degradation of their components and browning after shell removal, being recommended that in long processes final material temperature does not reach values higher than 40°C, or is submitted to rapid drying conditions. An overall analysis based on the combination of product quality, mass transfer and energy consumption aspects has indicated the IR heating temperature of 160°C as the optimum condition to fast and efficiently reduce the moisture to levels considered safe for storage, preserving quality attributes of the product. Regarding the influence of shell, it is not needed to peel the seeds before drying, leading to non-time consuming process, also avoiding additional costs with a pre - treatment step of the material.

WORDS-KEY: IR drying; Moringa seeds; Shrinkage; Mass transfer.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Composição físico - química das sementes da <i>Moringa oleífera</i> Lam. ...	25
Tabela 2-2: Equações semi - empíricas utilizadas para a descrição da cinética de secagem de sementes e grãos.	30
Tabela 4-1: Propriedades físicas das sementes <i>in natura</i>	70
Tabela 4-2: Resultados típicos da análise de imagens para as sementes de moringa com e sem tegumento, em diferentes teores de umidade, durante o processo de secagem a $T_{IR}=90^{\circ}C$	72
Tabela 4-3: Coeficientes de difusão estimados durante o processo de secagem das sementes de moringa com e sem tegumento, sem considerar e considerando o encolhimento.	90
Tabela 4-4: Parâmetros de ajuste para as equações de secagem.....	92
Tabela 4-5: Consumo de energia na secagem infravermelho de sementes de moringa..	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: <i>Moringa oleífera</i> Lam.....	22
Figura 2-2: Semente da <i>Moringa oleífera</i>	22
Figura 2-3: Exemplo de Curva de Secagem.	29
Figura 3-1: Sementes de <i>Moringa oleífera in natura</i>	52
Figura 3-2: Esquema do secador infravermelho.....	53
Figura 3-3: Vagens da <i>Moringa oleífera</i> Lam.....	54
Figura 3-4: Sementes de moringa. (a) retiradas da vagem, (b) após corte das valvas, (c) sem tegumento.....	55
Figura 3-5: Formato das sementes da <i>Moringa oleífera</i>	56
Figura 3-6: Sementes da <i>Moringa oleífera</i> com e sem tegumento, respectivamente.....	57
Figura 3-7: Aparato para realização da captura de fotos das sementes de moringa.....	59
Figura 3-8: Foto das sementes de moringa com tegumento retirada em tempos pré-determinados com auxílio de câmera digital, durante a realização do processo de secagem a $T_{IR} = 90^{\circ}C$	59
Figura 4-1: Distribuição do comprimento das sementes de moringa <i>in natura</i> com tegumento.	68
Figura 4-2: Distribuição do comprimento das sementes de moringa <i>in natura</i> sem tegumento.	69

Figura 4-3: Diâmetro equivalente das sementes com e sem tegumento, em função do teor de umidade.....	73
Figura 4-4: Esfericidade das sementes com e sem tegumento, em função do teor de umidade.	74
Figura 4-5: Razão do encolhimento volumétrico das sementes de moringa com e sem tegumento em função do teor de umidade, para diferentes temperaturas de aquecimento IV.....	75
Figura 4-6: Razão do encolhimento superficial das sementes de moringa com e sem tegumento em função do teor de umidade, para diferentes temperaturas de aquecimento IV.....	76
Figura 4-7: Variação de volume das sementes de moringa com tegumento em função da variação do volume de água removida, em diferentes temperaturas de aquecimento IV.	78
Figura 4-8: Variação de volume das sementes de moringa sem tegumento em função da variação do volume de água removida, em diferentes temperaturas de aquecimento IV.	79
Figura 4-9: Densidade aparente das sementes de moringa com e sem tegumento em função do adimensional de umidade, em diferentes temperaturas da fonte de aquecimento IV.....	80
Figura 4-10: Densidade de fluxo de umidade em função do teor de umidade, para sementes de moringa com tegumento.....	81
Figura 4-11: Densidade de fluxo de umidade em função do teor de umidade, para sementes de moringa sem tegumento.	82
Figura 4-12: Teor de umidade adimensional das sementes de moringa com tegumento em função do tempo, para as diferentes temperaturas da fonte de aquecimento.	83

Figura 4-13: Temperatura da superfície das sementes de moringa com tegumento em função do tempo, para as diferentes temperaturas da fonte de aquecimento.	84
Figura 4-14: Densidade de fluxo de umidade das sementes de moringa com tegumento em função do tempo, para as diferentes temperaturas da fonte de aquecimento.....	85
Figura 4-15: Teor de umidade adimensional das sementes de moringa com e sem tegumento em função do tempo, para diferentes temperaturas da fonte de aquecimento.	86
Figura 4-16: Temperatura da superfície das sementes de moringa com e sem tegumento em função do tempo, para diferentes temperaturas da fonte de aquecimento.	87
Figura 4-17: Densidade de fluxo de umidade das sementes de moringa sem tegumento em função do tempo, para diferentes temperaturas da fonte IV empregadas.....	88
Figura 4-18: Densidade de fluxo de umidade das sementes de moringa com e sem tegumento em função do adimensional de umidade, para $T_{IR} = 90^{\circ}\text{C}$	89
Figura 4-19: Curvas de secagem experimentais e preditas pelas equações semi-empíricas para as sementes de moringa com tegumento expostas à temperatura da fonte de aquecimento IV de 160°C	93
Figura 4-20: Eficiência energética em função do adimensional de umidade, durante a secagem IV de sementes de moringa sem tegumento.	94
Figura 4-21: Eficiência energética em função do adimensional de umidade, durante a secagem IV de sementes de moringa com tegumento.	94
Figura 4-22: Ângulo hue em função da temperatura e teor de umidade das sementes sem tegumento secas com $T_{IV} = 120^{\circ}\text{C}$	101
Figura 4-23: Imagens das sementes de moringa sem tegumento durante a secagem com $T_{IV} = 120^{\circ}\text{C}$	101

NOMENCLATURA

a	Comprimento	mm
A	Área	mm ²
$a, b, c \text{ e } n$	Parâmetros das equações de secagem	(-)
a^*, b^*, L^*	Parâmetros de cor	(-)
A_p/A_{p0}	Razão de encolhimento superficial	(-)
b	Largura	mm
c	Espessura	mm
d_p	Diâmetro equivalente	mm
DMR	Desvio relativo médio	(-)
D_{ef}	Difusividade efetiva	mm ² /s
D_g	Diâmetro geométrico	mm ³
dF	Diâmetro de Feret	mm
e	Excentricidade	(-)
E_e	Energia específica	MJ/kg
H^*	Ângulo hue	°
IE	Índice de escurecimento	(-)
k	Constante de secagem	m ⁻¹
m	Massa	Kg
N_w	Densidade de fluxo de água	g · H ₂ O/min · m ²
P	Perímetro	(-)
Pot	Potência	w
R_0	Raio da partícula	mm
R^2	Coefficiente de correlação	(-)
S_b	Razão de encolhimento volumétrico	(-)
t	Tempo	s
T	Temperatura	°C
V_p	Volume da partícula	mm ³
V_{p0}	Volume inicial da partícula	(-)

YR	$\equiv \sum_{j=1}^n \frac{6}{(j\pi)^2} \exp \left[-(j\pi)^2 \frac{D_{ef}}{R^2} t \right]$, Umidade adimensional	(-)
X	Umidade da partícula	(-)
XR	$\equiv \sum_{j=1}^n \frac{6}{(j\pi)^2} \exp \left[-(j\pi)^2 \frac{D_{ef}}{R_0^2} t \right]$, Umidade adimensional	(-)
C	Circularidade	(-)
ΔE	Alteração da coloração	(-)
η	Eficiência	(-)
ρ_a	Densidade aparente	Kg/mm ³
ς	Alongamento	(-)
ϕ	Esfericidade	(-)
φ	Fator de forma	(-)

Subscritos

proj	Projetada
max	Máximo
min	Mínimo
eq	Equilíbrio
f	Fonte de aquecimento
s	Superfície
ss	Sólido seco
w	Água
0	Valor inicial

Abreviações

IV	Infravermelho
b.u	Base úmida
b.s	Base seca

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	<i>MORINGA OLEÍFERA LAM</i>	21
2.1.1	<i>Características físico-químicas</i>	24
2.2	<i>SECAGEM</i>	25
2.2.1	<i>Secador via radiação infravermelha</i>	26
2.2.2	<i>Cinética de secagem</i>	28
2.3	<i>ENCOLHIMENTO</i>	32
2.3.1	<i>Fatores que influenciam o encolhimento</i>	33
2.3.2	<i>Modelos matemáticos</i>	38
2.4	CARACTERIZAÇÃO DAS SEMENTES	43
2.4.1	<i>Dimensões</i>	43
2.4.2	<i>Esfericidade</i>	44
2.4.3	<i>Massa específica</i>	46
2.5	<i>QUALIDADE DAS SEMENTES</i>	47
2.5.1	<i>Viabilidade Fisiológica</i>	47
2.5.2	<i>Atributos de cor</i>	49
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1	<i>MATERIAIS</i>	52
3.2	<i>EQUIPAMENTO</i>	53
3.3	<i>METODOLOGIA</i>	53
3.3.1	<i>Coleta dos frutos</i>	54
3.3.2	<i>Caracterização das sementes</i>	55
3.3.3	<i>Experimentos de secagem infravermelho</i>	56
3.3.4	<i>Caracterização e análise do encolhimento</i>	58
3.3.5	<i>Análise da cinética de secagem</i>	61
3.3.6	<i>Consumo de energia do processo</i>	64
3.3.7	<i>Avaliação dos atributos de qualidade das sementes de moringa secas por IV.</i> .	66

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1	<i>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS SEMENTES DE MORINGA OLEÍFERA IN NATURA</i>	68
4.2	<i>CARACTERÍSTICAS DE ENCOLHIMENTO DAS PARTÍCULAS</i>	71
4.2.1	<i>Alterações das dimensões e forma das partículas durante a secagem.</i>	71
4.2.2	<i>Encolhimento superficial e volumétrico das partículas.</i>	75
4.3	<i>CINÉTICA DE SECAGEM</i>	81
4.3.1	<i>Influência das alterações na área de transferência induzidas pelo encolhimento.</i>	81
4.3.2	<i>Influência da temperatura da fonte de aquecimento</i>	83
4.3.3	<i>Influência da remoção do tegumento</i>	86
4.3.4	<i>Difusividades mássicas efetivas</i>	89
4.3.5	<i>Discriminação das equações de secagem</i>	91
4.4	<i>ASPECTOS ENERGÉTICOS</i>	93
4.5	<i>EFEITOS DA SECAGEM IV SOBRE ATRIBUTOS DE QUALIDADE DAS SEMENTES</i>	96
4.5.1	<i>Viabilidade fisiológica</i>	96
4.5.2	<i>Atributos de cor</i>	97
5	CONCLUSÕES	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

1 INTRODUÇÃO

Moringa oleífera Lamarck é uma planta muito resistente, que possui rápido crescimento e é encontrada principalmente na região Nordeste do país (SANTOS, 2010). Quase todas as partes da *Moringa oleífera* podem ser aproveitadas, suas folhas e flores possuem diversas vitaminas que podem auxiliar a suplementação da alimentação humana e animal (ARAICA *et al.*, 2011), além de propriedades fitoterápicas (RAJANANDH *et al.*, 2012). As sementes também possuem diferentes aplicações, dentre elas a extração de óleo que pode ser utilizado na alimentação e ainda como potencial alternativa para a produção do biodiesel (MOFIJUR *et al.*, 2014a). Por possuírem propriedades coagulantes, as sementes podem ainda auxiliar no tratamento de purificação da água (JESUS *et al.*, 2013).

Por ser uma cultura típica da região nordeste, o aproveitamento de todos seus constituintes por meio de tecnologias adequadas pode promover um desenvolvimento agroindustrial capaz de fornecer produtos com diferentes potenciais aplicáveis a diferentes tipos de indústria, fortalecendo desse modo o parque tecnológico dessa região do Brasil.

As sementes da *Moringa oleífera* são colhidas com um teor de umidade extremamente elevado, acima de 50% em base úmida, o que pode provocar o desenvolvimento de microrganismos e causar a deterioração do material gerando a perda do produto, seja como fonte alimentícia ou mesmo matéria-prima para a indústria. Além disso, um alto teor de umidade pode afetar a qualidade do óleo a ser extraído. Deste modo, um processo de secagem adequado torna-se fundamental, pois além de assegurar a estabilidade microbiológica, contribuindo para um maior tempo de armazenamento, esse processo pode ainda concentrar os nutrientes destas sementes, tornando-as mais atrativas.

A secagem via radiação infravermelha (IV) é uma alternativa que permite um processamento térmico rápido e eficaz de retirada da umidade. Esse método de secagem quando comparado a outros utilizados para conservar produtos agrícolas, como a secagem ao sol e a secagem convectiva, apresenta algumas vantagens como a não dependência das condições climáticas e o curto tempo de secagem. Ademais, sementes de moringa são particularmente interessantes para a secagem IV, à medida que possuem altos teores de umidade, lipídeos e

proteínas e, conseqüentemente, uma elevada capacidade de absorção de energia eletromagnética na região do IV.

Com base nos trabalhos disponíveis na literatura, nota-se que a aplicação da radiação infravermelha para secagem de sementes de moringa é um campo ainda a ser explorado.

Condições operacionais inadequadas da secagem IV podem, entretanto, afetar a qualidade do produto. Desse modo, a realização de estudos que viabilizem a compreensão da influência da secagem IV sobre diferentes atributos de qualidade do produto, bem como sobre os fenômenos que ocorrem durante o processo, é altamente desejável.

Um desses fenômenos que podem ocorrer durante o processo de secagem de alguns materiais é o encolhimento. Diferentemente das outras oleaginosas, como girassol e soja, as sementes de moringa, devido a sua elevada umidade, são susceptíveis a uma significativa contração de volume durante a secagem. O aquecimento e a perda de água provocam tensões na estrutura do material e isso provoca uma retração de suas dimensões, que leva a mudanças em suas propriedades físicas, afetando assim os fenômenos de transferência de calor e massa.

O fenômeno do encolhimento pode acarretar em danos mecânicos como é o caso das rachaduras e crostas, que afetam a integridade física do material. Apesar de ser um fator que influencia na transferência de calor e massa, o encolhimento geralmente é negligenciado na modelagem do processo, o que pode acarretar resultados errôneos (SACILIK, 2007; FLORES *et al.*, 2012; IRIGOYEN *et al.*, 2014). Entretanto, alguns trabalhos relatam a importância da consideração do encolhimento na análise das características de secagem de diferentes materiais (KOÇ *et al.*, 2008; JANJAI *et al.*, 2010; CURCIO e AVERSA, 2014).

Diversos trabalhos encontrados na literatura (SANTOS, 2009; GONELI *et al.*, 2011; SIQUEIRA *et al.*, 2012) relatam a contração volumétrica das sementes oleaginosas submetidas à secagem convencional. Entretanto, poucos são os trabalhos existentes sobre a secagem de sementes de *Moringa oleífera*, tampouco sobre suas características de encolhimento. Estudos sobre a influência do tegumento da semente sobre a transferência de calor e massa durante o processo de secagem de sementes também não foram encontrados, bem como são escassas na literatura informações sobre a influência da intensidade de radiação IV sobre atributos de qualidade, tais como cor e viabilidade fisiológica.

Diante deste contexto, com o propósito de contribuir para a pesquisa, desenvolvimento e inovação de secadores com menor custo energético para esta espécie de semente, este trabalho teve como objetivo geral avaliar o uso da radiação eletromagnética na região do IV para a secagem de sementes de *Moringa oleífera* Lam, através de um estudo experimental envolvendo:

- A caracterização física das sementes com e sem tegumento;
- A caracterização do fenômeno de encolhimento das partículas durante o processo de secagem IV;
- A determinação da cinética de secagem em camada fina;
- A determinação das difusividades mássicas efetivas nas sementes expostas à radiação IV;
- Analisar a importância da consideração do encolhimento para uma interpretação física mais realística da transferência de massa durante a secagem do material;
- Avaliação da influência da remoção do tegumento sobre as características de secagem e de encolhimento das sementes;
- A avaliação da adequação de diferentes equações semi-empíricas para a descrição da cinética do processo;
- A avaliação do consumo de energia do processo, e
- A avaliação da influência das condições operacionais sobre atributos de cor e viabilidade fisiológica das sementes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente trabalho, foram estudadas sementes oleaginosas da *Moringa oleífera* Lam., investigando suas características físicas, cinética de secagem, encolhimento e a influência destes nos fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa. Neste capítulo são abordados os principais tópicos relacionados ao desenvolvimento do trabalho, fundamentando, então, as teorias relacionadas ao tema. Inicialmente, são destacados o valor nutricional e a crescente importância tecnológica das sementes de *Moringa oleífera*. Os aspectos tecnológicos e fundamentais do processo de secagem são então descritos, com enfoque na cinética de secagem infravermelho, no fenômeno de encolhimento das partículas, nos fatores que o afetam; nos tipos de encolhimento e nas equações matemáticas que os descrevem.

Por fim é feito um levantamento dos métodos utilizados para caracterizar as sementes e identificar o encolhimento, bem como uma breve abordagem dos atributos de qualidade do produto.

2.1 MORINGA OLEÍFERA LAM

A *Moringa oleífera*, conhecida como moringa, é uma espécie originária da Índia, tendo sido introduzida no Brasil há alguns anos. Ela pode se adaptar facilmente as condições do ambiente, crescendo em todos os tipos de solo e chegando a tolerar um longo período de seca, o que a torna uma planta com grande possibilidade de disseminação. As faixas de temperatura ideais para seu cultivo estão entre 26 e 40°C e a precipitação anual deve ser de pelo menos 500 mm, o que mostra sua fácil adaptação as condições climáticas da região Nordeste do Brasil (NASCIMENTO, 2014).

As suas sementes quando maduras são castanhas e esféricas com quase 1,0 cm de diâmetro e triaxiladas. Possuem “asas” na base e no ápice, 2 a 2,5 cm de comprimento, 0,4 a 0,7 cm de largura e escariosas (BROWN, 1950). São ricas em vários constituintes nutricionais como, proteínas e lipídeos, podendo ser explorada para fins alimentares. É possível ainda fazer extração de óleos das sementes, ricos em ácidos graxos, sendo a fração majoritária de ácido oleico e os ácidos palmítico e behênico, que podem ser utilizados como fonte para a produção de biodiesel.



Figura 2-1: *Moringa oleifera* Lam.

Essas sementes possuem qualidades fisiológicas que podem ser reduzidas devido a alguns fatores como: a operação da colheita, utilização de um método de secagem e beneficiamento inadequados para o tipo de semente, e ainda, as condições de armazenamento. Existem pesquisas relacionadas à secagem das sementes da moringa que mostram que esse processo apresenta grande valia quando utilizado de forma correta.



Figura 2-2: Semente da *Moringa oleifera*.

Fonte: Esnarriaga (2010).

Passos *et al.* (2012) comprovaram que a secagem das sementes de moringa permitiu obter valores nutritivos maiores que os encontrados na forma *in natura*, mostrando que a secagem enfatizou a concentração de nutrientes o que torna essa alternativa uma forma de otimização para a indústria de alimentos.

Bezerra *et al.* (2004) avaliaram a qualidade das sementes de *Moringa oleifera* durante o período de armazenamento. As sementes em estudo foram acondicionadas em dois diferentes tipos de ambientes e submetidas a quatro tempos de armazenamento, durante este período foram verificados: teor de água, porcentagem de germinação, comprimento da raiz, massa seca de plântula e condutividade elétrica destas. No estudo foi comprovada a influência das condições de temperatura e umidade neste período, mostrando que o controle destas permite a manutenção das qualidades características importantes das sementes, como a viabilidade de germinação. Com isso, é possível perceber que mesmo que se faça a operação de secagem correta, se o armazenamento for inadequado, a qualidade das sementes pode ser comprometida, ou seja, todos os passos desde a colheita até o armazenamento devem ser feitos de forma adequada para que se possa manter as qualidades físicas e nutricionais de uma semente saudável para que a mesma possa ser utilizada para diversos fins, desde a reprodução da espécie até a aplicação em diferentes indústrias.

Todas as partes da *Moringa oleifera* são utilizadas para diversas aplicações. Uma das aplicações mais utilizadas de suas sementes é no tratamento de água, como coagulante natural. Existem diversos estudos relacionados ao assunto: Nishi *et al.* (2011) avaliaram a eficiência das sementes de moringa como coagulante na remoção de alguns contaminantes de risco como *Giardia* e *Cryptosporidium*. Os estudos mostraram resultados satisfatórios com a redução de tais contaminantes, além de reduzir a cor e turbidez. Moreti *et al.* (2013) utilizaram as sementes de *Moringa oleifera* combinadas com membrana como uma alternativa à utilização de coagulantes químicos em sistemas de tratamento de água e obtiveram bons resultados em suas pesquisas, mostrando a eficiência dessas sementes para esse fim.

Estudos realizados por Rashid *et al.* (2008) e Oliveira *et al.* (2012), ainda comprovam a versatilidade dessas sementes. Os autores avaliaram a qualidade do biodiesel produzido a partir da transesterificação do óleo obtido das sementes de moringa e obtiveram resultados que mostraram que esse biodiesel tem características físico-químicas adequadas para o uso como matéria-prima para esse fim.

2.1.1 Características físico-químicas.

As sementes da *Moringa oleífera* ainda são pouco exploradas na área da pesquisa, desse modo são poucos os trabalhos encontrados na literatura que as caracterizam (SANTANA *et al.*, 2010; PASSOS *et al.*, 2012).

A Tabela 2-1 apresenta alguns resultados referentes à composição física e química das sementes de *Moringa oleífera* Lam. É notável a presença de nutrientes como proteínas, carboidratos e fibras, necessárias a nutrição, o que torna esse produto aplicável à suplementação de dietas e desenvolvimento de produtos alimentícios.

As sementes de moringa podem conter grande quantidade de óleo, o que dependerá de alguns fatores como: variedade da planta, o clima, a fase de maturação e o tempo da colheita. Silva *et al.*, (2010) tiveram um bom rendimento 39% (em peso) de óleo de sementes de moringa, sendo em sua maioria composto por ácido oleico 78%.

Aviara *et al.* (2013) avaliaram as propriedades físicas das sementes de *Moringa oleífera* submetidas a secagem chegando diferentes teores de umidade, entre 8,43% – 31,66% (b.s) para a semente e 6,75% – 31,50% para o “kernel”. O tamanho individual das sementes foi obtido utilizando um paquímetro digital, com isso foi observado que as dimensões destas estão relacionadas com a umidade das sementes, visto que com menores teores de umidade, menores foram os valores de comprimento, largura e espessura. Além disso, a variação das dimensões com o teor de umidade não acarretou em deformação do material em estudo o que indica que a alteração no tamanho das sementes ocorreu de forma uniforme ao longo de todos os eixos. A partir deste estudo, os autores realizaram ainda a classificação das sementes e kernel, em grandes, médias e pequenas, com base nos seus comprimentos.

Com a grande ênfase dada para as pesquisas no campo de biocombustíveis, existem algumas sementes que vêm ganhando destaque nacional nessa área como as sementes de girassol que possuem grande quantidade de óleo em sua constituição (BELTRÃO e OLIVEIRA, 2008). Alguns estudos realizados com sementes da *Moringa oleífera* contribuíram para comprovar que similarmente às sementes de girassol, elas possuem grande quantidade de óleos com potencial aplicação na produção do biodiesel (NETO *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2008; RASHID *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2010; MOFIJUR *et al.*, 2014b). Entretanto, essas sementes são colhidas com um elevador teor de umidade, desse modo, necessitam passar por um processo de secagem eficaz para garantir uma melhor preservação e/ou concentração dos seus constituintes.

Tabela 2-1: Composição físico-química das sementes da *Moringa oleífera* Lam.

Análises	Semente <i>in natura</i>	Semente seca
Umidade (%)	52,60 ± 0,96	2,67 ± 0,61
Lipídeos (%)	2,39 ± 0,92	17,37 ± 6,33
Proteínas (g/100g)	6,54 ± 0,56	23, 29 ± 5,58
Vitamina C (mg de aa/100g)	177,13 ± 8,23	110,30 ± 9,23
Carboidratos (%)	37,52 ± 1,80	52, 65 ± 1,39
Fibra Total(%)	3,95 ± 1,05	59,45 ± 5,98

Fonte: Adaptado de (Passos *et al.*, 2012).

Como é uma árvore facilmente encontrada na região Nordeste sua a adaptação à indústria tecnológica pode promover um desenvolvimento agroindustrial capaz de fornecer produtos com diferentes potenciais aplicáveis a diferentes tipos de indústria, fortalecendo desse modo o parque tecnológico dessa região do Brasil.

2.2 SECAGEM

A secagem é um dos métodos de conservação de alimentos mais antigos que se tem conhecimento. A secagem ao sol é uma das formas mais usadas de secagem de sementes e grãos, entretanto a utilização de secadores adequados pode tornar o processo mais rentável levando a produtos de melhor qualidade. Os principais objetivos do processo são: remover as substâncias voláteis do material de modo a desfavorecer o crescimento de microrganismos que causam a deterioração do produto, com isso, o material pode ser conservado por um período maior de tempo e facilitar o transporte e armazenamento devido à redução do tamanho do produto.

O processo de secagem é caracterizado pelo transporte simultâneo de calor e massa, que são governados por alguns fatores, A transferência de calor pode ocorrer por condução, convecção e/ou radiação, por meio dos quais a energia na forma de calor é fornecida ao produto para aquecer e vaporizar a umidade contida no sólido, transportando-a do interior até a superfície da semente. Em seguida devido a diferença entre a pressões de vapor de água na semente e na vizinhança, ocorre o transporte do vapor da superfície para o meio.

Existem vários métodos de secagem, que devem ser escolhidos de acordo com a qualidade do produto a ser seco, dos objetivos a serem alcançados, dos recursos e equipamentos disponíveis. No processo de secagem, as condições operacionais como a temperatura, fluxo de ar e tempo de exposição do material devem ser controladas para que o processo seja viável e não ocorram deteriorações ou mesmo alterações indesejáveis ao produto final.

O tempo de secagem e os custos são fatores que são levados em consideração no processo de secagem, principalmente em escala industrial. A radiação infravermelha isolada seja com radiação contínua ou intermitente vem sendo estudada e aplicada no processo de secagem de diferentes materiais e tem ganhado destaque por promover a retirada de umidade em um menor tempo, o que indica sua eficiência. Além disso, essa tecnologia também é adaptada e combinada com outros métodos de secagem visando a otimização do processo e obtenção de um produto final com maior qualidade.

2.2.1 Secador via radiação infravermelha.

Na secagem por radiação infravermelha o aquecimento é realizado via energia eletromagnética com comprimento de onda em torno de 0,75 a 100 μm , para a secagem em camada espessa (0,75 a 3,00 μm) apresenta melhores resultados, já para a secagem em camada fina (25 a 100 μm) são mais eficientes (NOWAK e LEWICKI, 2004). Nesse método o material é seco diretamente pela absorção da radiação, que é transferida da fonte de aquecimento para a superfície do produto, sem aquecer o ar circundante. Desse modo não existe a transferência de calor do ar e a radiação que é absorvida pela superfície do produto penetra—o sendo em seguida convertida em calor sensível (GINZBURG, 1969 *apud* KHIR, 2011).

Se comparada com o aquecimento por convecção, a radiação infravermelha apresenta algumas vantagens como: (1) equipamento compacto e de simples manuseio; (2) coeficiente de transferência de calor elevado; (3) menor tempo de secagem e, conseqüentemente, menor custo de energia; (4) o processo pode ser realizado apenas direcionando a fonte de calor e energia eletromagnética para a superfície do material a ser desidratado; (5) alta qualidade do produto final e (6) fácil adaptação a outros métodos de secagem (KHIR *et al.*, 2011). Estudos sobre a secagem de alimentos, grãos e sementes em camada fina utilizando a radiação infravermelha são encontrados na literatura.

Nowark e Lewicki (2004) empregaram a secagem convectiva em fatias de maçã, os autores observaram que a velocidade do ar é uma variável importante durante a secagem, visto que à medida que o ar flui em contato com o material, a superfície deste esfria, tornando o processo de retirada de umidade mais longo. Foi realizada também a secagem por radiação infravermelha de fatias de maçãs nas mesmas condições operacionais aplicadas a secagem por convecção, os resultados foram comparados e mostraram que o tempo de secagem pode ser reduzido em até 50% com o uso da radiação infravermelha.

Togrul (2006) fez um estudo característico de secagem infravermelho de cenoura; onde foram utilizadas temperaturas da fonte de aquecimento de 50 a 80°C. O resultado do estudo mostrou que a velocidade de secagem diminui continuamente com o tempo e teor de umidade. Além disso, observou-se que a taxa de secagem aumenta significativamente com o aumento da temperatura.

Santos (2009) empregou e comparou a secagem por convecção e radiação infravermelha de sementes de girassol. Foi concluído que o uso do secador infravermelho tem um maior potencial para remover umidade das sementes em temperaturas superiores a 50°C. Além disso, o método apresentou uma maior eficiência energética.

Khiri *et al.* (2011) estudaram os efeitos causados pela secagem por radiação infravermelha na difusividade das sementes de arroz com casca. Foi então observado que os coeficientes de difusão de umidade durante o aquecimento por radiação infravermelha apresentaram-se muito maiores quando comparados ao encontrados na secagem convectiva.

Ponkham *et al.* (2012) combinaram a secagem por convecção e infravermelho para modelar a secagem de abacaxi. Como esperado, seus estudos mostraram que uma maior intensidade da radiação infravermelha leva a uma absorção de calor maior, tornando a temperatura do produto maior. Com isso, existe uma maior força motriz de transferência de massa, logo a taxa de secagem torna-se mais rápida e, conseqüentemente, o tempo de secagem é menor. No estudo foi ainda observado que a velocidade do ar de secagem não influenciou significativamente o coeficiente de difusão de umidade.

Xu *et al.* (2014) avaliaram o efeito da secagem infravermelho sob a temperatura e o estado de transição vítrea em cenouras. O estudo mostrou que, ao longo do tempo, a radiação infravermelha provocou mudanças no estado da água das cenouras, contribuindo para um aumento da temperatura de transição vítrea.

Os produtos agrícolas geralmente possuem grande teor de umidade. Essa característica influencia a absorção da radiação infravermelha afetando, por sua vez, a cinética de secagem. Geralmente, os materiais sólidos absorvem a radiação infravermelha apenas na camada superficial. Já em materiais porosos, a radiação pode penetrar até as camadas mais internas, dependendo do teor de umidade do material. Desse modo, durante a secagem a capacidade da absorção da umidade diminui e a refletividade do material aumenta.

A radiação infravermelha é de grande interesse na secagem de sementes oleaginosas como as sementes da *Moringa oleífera* Lamarck, pois estas possuem grande quantidade de lipídeos e proteínas em sua composição que tem fortes bandas de absorção, o que permite uma melhor transferência de calor e massa durante o processo de desidratação.

2.2.2 Cinética de secagem

O objetivo da cinética de secagem é descrever a variação da umidade e temperatura de um material em função do tempo. Alguns fatores, tais como temperatura, velocidade e umidade relativa do ar devem ser levados em consideração na realização do experimento, para que a transferência de massa que permeia a secagem seja descrita corretamente. Geralmente, a transferência de calor e de massa que ocorre na operação da secagem engloba três etapas ou períodos distintos, definidos em termos da evolução da umidade, temperatura e velocidade de secagem em função do tempo, conforme ilustrado na Figura 2-3 (PARK *et al.*, 2007):

- Período 0: No início da secagem a temperatura do ar de secagem é superior a dos grãos, devido a pressão de vapor da água na superfície do grão ser baixa a transferência de umidade é lenta. O período termina quando a transferência de massa é compensada pela transferência de calor;
- Período 1: Nesta etapa as transferências simultâneas de massa e calor são compensadas tornando um período de secagem constante. Quando a quantidade de água que migra do interior até a superfície do grão torna-se escassa, ou seja, não acompanha a perda por evaporação da água na superfície da semente o período termina;

- Período 2: A quantidade de água possível de ser retirada é mínima e então há uma taxa decrescente de secagem. Como as trocas de calor entre a semente e o ar não se compensam, a temperatura da semente tende a temperatura do ar de secagem até chegar a um equilíbrio onde então não há mais secagem.

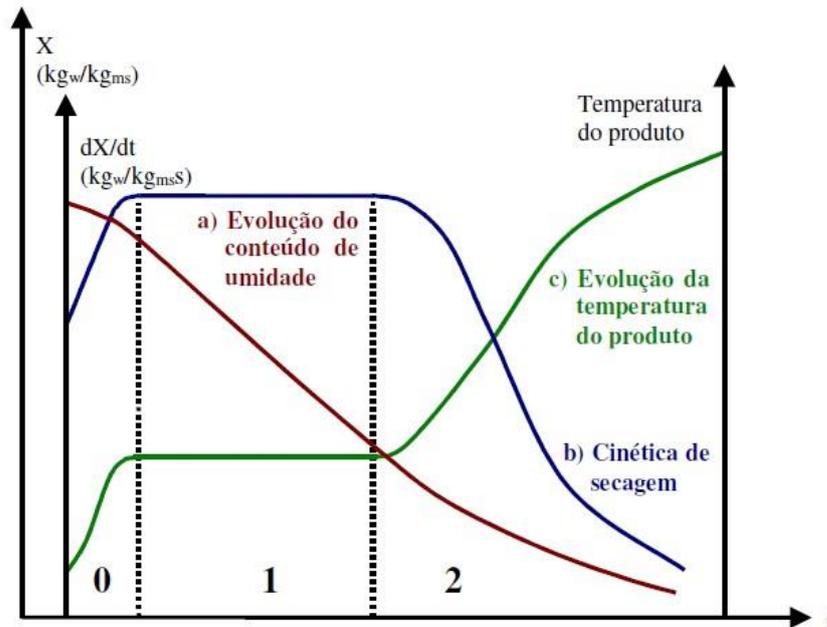


Figura 2-3: Exemplo de Curva de Secagem.

Fonte: PARK *et al.*, (2007).

Trabalhos relacionados à cinética de secagem de grãos e sementes são amplamente encontrados na literatura (MEDEIROS, 2004; GINER E GELY, 2005; VÉRAS, 2010; PESSOA *et al.*, 2011; GOUVEIA *et al.*, 2011).

Flores *et al.* (2012) secaram sementes de mamona (*Ricinus communis*) em leito fluidizado com o objetivo de estudar o efeito de altas temperaturas na cinética de secagem e aplicar um modelo matemático que melhor represente o processo. As sementes, por sua vez, apresentaram um comportamento típico de produtos biológicos quando submetidos à secagem, apresentando um processo que ocorre predominantemente em período decrescente.

A cinética de secagem de materiais granulares, como grãos e sementes, é investigada através de estudos em camada fina. Várias equações teóricas, semi-empíricas e empíricas são aplicadas para descrever o comportamento de secagem em camada fina. Para escolha da

equação que descreva satisfatoriamente a cinética de secagem deve-se observar qual se ajusta de forma mais adequada ao tipo material estudado, nas condições operacionais estabelecidas.

Dentre as equações semi-empíricas existentes na literatura, as mais utilizadas para descrever a secagem de grãos e sementes são apresentadas na Tabela 2-2.

Tabela 2-2: Equações semi-empíricas utilizadas para a descrição da cinética de secagem de sementes e grãos.

Nome do modelo	Equações de secagem semi – empíricas mais utilizadas para grãos e sementes	Referência
Lewis	$XR = \exp(-kt) \quad (2-1)$ <p>Onde: $k = a \cdot \exp\left(\frac{-b}{T_f}\right)$</p>	Lewis (1921)
Page	$XR = \exp(-kt^n) \quad (2-2)$ <p>Onde: $k = \exp\left(\frac{-b}{T_f}\right)$</p>	Page (1949)
Brooker et al.	$XR = c \cdot \exp(-kt) \quad (2-3)$ <p>Onde: $k = a \cdot \exp\left(\frac{-b}{T_f}\right)$</p>	Brooker et al. (1974)

A equação exponencial proposta por Lewis (1921) faz analogia à lei de Newton do resfriamento. A equação proposta por Page *apud* Barrozo (1995) é uma modificação da forma integrada da equação de Lewis, sendo frequentemente utilizada em estudos de secagem de produtos agrícolas. Brooker *et al* (1974) também propuseram uma equação baseada em modificações da equação de Lewis, utilizada para secagens longas.

Um dos modelos teóricos tradicionalmente empregado para descrever a migração da umidade no interior das partículas durante o processo de secagem é o modelo difusivo, baseado na segunda lei de Fick:

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

Onde:

X: Umidade no tempo (kg H₂O/kg massa seca);

ρ_d : massa específica (kg/m³)

D_{ef} : Difusividade efetiva da água (m²/s);

t: tempo (s).

Ao considerar a semente como uma partícula esférica de raio R, a equação da difusão em coordenadas esféricas é expressa como:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{ef} r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(D_{ef} \sin \theta \frac{\partial X}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial \phi} \right) \quad (2-5)$$

Assumindo como hipóteses simplificadoras:

- umidade inicial (X_0) da partícula uniforme;
- transferência de massa unidimensional (somente na direção radial);
- difusão radial simétrica;
- teor de umidade na superfície da partícula atinge instantaneamente o valor de equilíbrio (X_{eq}) nas condições de temperatura e umidade relativa do processo;
- coeficiente de difusão efetivo de massa (D_{ef}) constante e encolhimento negligenciável.

Sob essas hipóteses, a Equação 2.5 se reduz a:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{ef} r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (2-6)$$

Em conjunção com as seguintes condições inicial e de contorno:

$$CI: X(r,0) = X_0 \quad (2-7)$$

$$CC1: \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (2-8)$$

$$CC2: X(R,t) = X_{eq} \quad (2-9)$$

Aplicando as condições iniciais e de contorno, a solução analítica é obtida a partir do método de separação de variáveis. A resposta transiente de umidade é dada pela equação:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \sum_{j=1}^N \frac{6}{(j\pi)^2} \exp \left[- (j\pi)^2 \frac{D_{ef}}{R_0^2} t \right] \quad (2-10)$$

Esse modelo descreve adequadamente a secagem em camada fina de partículas apenas durante o período a taxa decrescente.

2.3 ENCOLHIMENTO

Uma das principais características observadas durante a secagem de materiais é o fenômeno do encolhimento. Essa alteração na sua estrutura que leva a modificações na forma e volume pode acarretar o endurecimento além do aparecimento de fissuras ou fraturas e até mesmo afetar a capacidade de reidratação do material. Pode, portanto, ser um fator crucial que pode interferir de forma negativa na qualidade do produto final (GIRI e PRASAD, 2007;

HOFSETZ, 2013; LOPES, 2013; STURM *et al.*, 2014). Essas características em alguns alimentos podem, na maioria das vezes, prejudicar sua aceitação no mercado, devido à impressão negativa que causa ao consumidor.

Madiouli *et al.* (2007) definiram o encolhimento como a razão entre o volume num dado instante de tempo t e o volume inicial, dado por:

$$S_b = \frac{V_p}{V_{p0}} \quad (2-11)$$

A influência do encolhimento sobre os fenômenos de transporte que ocorrem durante a desidratação de produtos, bem como sua quantificação, são extremamente necessárias para um melhor entendimento da cinética de secagem e obtenção de informações mais realistas acerca da difusão de umidade (BIALOBRZESKI *et al.*, 2008).

2.3.1 Fatores que influenciam o encolhimento

Existem várias características e fatores que estão relacionados ao fenômeno do encolhimento. Na literatura muitos autores buscam caracterizar os mecanismos relacionados ao fenômeno a partir do estudo das diferentes condições do processo de secagem e características do material estudado.

O encolhimento sofre influência da temperatura, entretanto, esta não é a única propriedade que o afeta, a umidade do material e também a velocidade do ar estão diretamente ligadas ao fenômeno.

i) *Temperatura*

Sturm *et al.* (2014) analisaram a influência da temperatura do ar na cinética de secagem de maçãs. Os autores verificaram um maior encolhimento das fatias de maçã secas em temperaturas mais elevadas. Katewaka (2006) também relataram que a temperatura do gás de secagem induziu uma mobilidade maior da banana, influenciando positivamente o encolhimento.

Darvishi *et al.* (2013) analisam os efeitos da temperatura e da velocidade do ar na secagem de grãos de soja em secador de leito fluidizado, onde puderam observar que as temperaturas do ar apresentaram uma maior influência sobre os parâmetros de qualidade do grãos como a densidade em grãos da massa e o grau de encolhimento enquanto as mudanças de velocidade do ar não tiveram nenhum efeito significativo.

Siqueira *et al.* (2012) secaram sementes de pinhão – manso (*Jatropha curcas* L.) a várias temperaturas. Com o estudo observaram que o teor de umidade e temperatura de secagem contribuíram para o encolhimento das sementes. O fenômeno foi então descrito satisfatoriamente por equação polinomial.

ii) *Teor de umidade*

Teoricamente, o encolhimento deveria ser igual ao volume de água evaporada. Em alguns casos, como no encolhimento por secagem de cenoura feita por Krokida e Maroulis (1997), esse comportamento foi observado durante todo o processo. Quando o material está no estado elástico a perda de umidade é quase inteiramente compensada pela contração do material, logo o volume diminui linearmente com a umidade, ou seja, o encolhimento é livre. Porém, muitos materiais constituídos de células e tecidos de origem vegetal possuem uma resistência mecânica que limita as variações de volume no decorrer do processo de secagem. A remoção de água devido ao aumento da temperatura no sistema causa rigidez no material que passa para o estado vítreo, fazendo com que o encolhimento observado seja significativamente menor.

Os alimentos, geralmente, possuem um grande teor de umidade o que permite um encolhimento significativo. Por outro lado, a contração de volume é menos significativa durante o processo de secagem de produtos com menor teor de umidade tais como grãos (AFONSO JR *et al.*, 2000).

iii) *Geometria*

O encolhimento dos produtos como os agrícolas não é função apenas da variação do teor de umidade, mas também da condição do processo de secagem e da forma do produto (LOPES, 2013; RATTI, 1994). Um pesquisador que observou essa influência foi Katewaka em (2006), tendo constatado que as amostras de bananas avaliadas em sua pesquisa foram

fortemente influenciadas pela estrutura do produto. As duas fases da parte comestível da fruta, endocarpo e mesocarpo, possuíram comportamentos diferentes, tanto em relação à transferência de massa quanto ao encolhimento. O mesocarpo tem o encolhimento limitado por secar mais rápido. Então, como a maioria desses produtos agrícolas não apresenta uma forma geométrica definida, uma forma conhecida geralmente é assumida para resolver problemas onde a geometria do produto é importante.

iv) *Porosidade*

Rotineiramente, o encolhimento é considerado um efeito causado apenas por um desequilíbrio mecânico devido à remoção de água líquida do material, que ocorre por capilaridade, durante a secagem. Entretanto, em alguns casos, a fração volumétrica de ar no interior do material, também conhecida como porosidade, não deve ser desprezada. Existem alguns fatores que também podem influenciar a formação de poros, como a tensão superficial, a estrutura, pressão ambiente e até os mecanismos de transporte de umidade (ZIELINSKA e MARKOWSKI, 2010). O encolhimento de um material poroso submetido a secagem pode ocorrer em diferentes direções (LOPES, 2013).

Quando a redução de volume é proporcional à perda de água durante a secagem, ocorre equilíbrio mecânico e o encolhimento é chamado ideal. Entretanto, quando a quantidade de água removida é maior que a redução no volume da amostra, pode-se ocorrer a variação da porosidade, onde inicia-se a formação de espaços “vazios” no interior da matriz sólida, nesse caso o encolhimento é conhecido como não ideal (ACHANTA *et al.*, 1997; MERCIER *et al.*, 2011; KHALLOUFI *et al.*, 2010, MADIOULLI *et al.*, 2012).

Dissa *et al.* (2010) observaram um aumento da porosidade da *Spirulina* em seus experimentos e o relacionaram a perda de umidade durante a secagem e a rigidez do produto, o que resultou em um menor encolhimento.

v) *Tensão*

A diferença entre as pressões interna e externa, também chamada pressão de encolhimento, causada pelos gradientes de temperatura e umidade do processo de secagem, gera tensões no material que acarretam o encolhimento (MAYOR e SERENO, 2004; HOFSETZ, 2013). Essas tensões dependem das características do material bem como das

condições de operação. (Hashemi *et al.*, 2009) afirmam que tanto células animais como vegetais possuem uma propriedade característica chamada turgescência, onde os líquidos contidos na parede das células causam uma pressão sobre a mesma, que comprime o líquido em seu interior. No decorrer do processo de secagem, a água retirada gera o desenvolvimento de tensões, causando o encolhimento. Quando o processo de secagem ocorre lentamente, as tensões que o líquido exerce contra as paredes do material ocorrem de forma mais gradual o que acarreta num maior encolhimento. Em altas temperaturas, a secagem torna – se mais rápida, as tensões internas ocorrem de forma brusca, resultando em uma estabilização do encolhimento.

Ocasionalmente, determinados materiais podem ter um maior encolhimento em alguma região, devido a tensões não uniformes, enquanto outros possuem maior umidade ou mesmo tendência a se deformar e conseqüentemente terão uma redução maior em seu volume (MAJOR e SERENO, 2004; STURM *et al.*, 2014). Portanto, a base teórica para determinação do encolhimento deve envolver leis mecânicas, que compreendam a tensão no material e as deformações durante a desidratação (RATTI, 1994; HOFSETZ, 2013).

Muitos alimentos, principalmente frutas e vegetais, podem apresentar um grau de encolhimento elevado quando seco, pois quanto mais água é removida mais tensões de contração são originadas no material.

vi) *Transição Vítrea*

Segundo Arrieche (2003) o encolhimento para vários materiais é considerado como uma função linear da concentração de água, até a transição vítrea, onde o fenômeno do encolhimento termina. A temperatura de transição vítrea é uma propriedade específica de um material amorfo e refere-se à temperatura de mudança de fase, na qual um sólido vítreo é transformado em uma forma gomosa, e vice –versa. Ela tem sido utilizada como um indicador da mobilidade molecular que altera a difusividade das moléculas (SOPAIDE *et al.*, 2007; KUROZAWA *et al.*, 2014; HOFSETZ, 2013).

A mobilidade da amostra está relacionada com o seu estado físico, a mobilidade elevada corresponde a um comportamento elástico típico de um estado semelhante a borracha, ao passo que a mobilidade baixa corresponde a um comportamento característico de um estado vítreo, que é termodinamicamente um estado de não equilíbrio dependente do tempo. No decorrer do processo de secagem o teor de umidade diminui, tornando o material vítreo e reduzindo a taxa

de encolhimento devido a menor mobilidade (MAYOR e SERENO, 2004; KATEKAWA, 2006). O estado vítreo contribui para a difusão de vários componentes em estruturas de alimentos (ROSS, 2010).

Kurozawa *et al.* (2012) fizeram pesquisas sobre o fenômeno do encolhimento e a transição vítrea na secagem de mamão papaia. Para descrever o efeito plastificante da água nas amostras, foi usado o modelo de Gordon e Taylor de 1952:

$$T_g = \frac{w_s T_{gs} + k w_w T_{gw}}{w_s + k w_w} \quad (2-12)$$

em que: T_g é a temperatura de transição vítrea da mistura binária, T_{gs} é a temperatura do extrato seco, T_{gw} é a temperatura de transição vítrea da água, w_s é a fração de matéria seca, w_w é a fração de água e k é uma constante do modelo. Concluindo que os dados obtidos para T_g foram satisfatórios e que modelo de matemático baseado em Fick considerando o encolhimento mostrou um melhor resultado quando comparado ao modelo sem a consideração do encolhimento.

Kurozawa *et al.* (2014) estudaram a degradação do ácido ascórbico presente em cubos de mamão papaia submetidos a uma secagem de ar quente e se existe uma influência da temperatura e do fenômeno de transição vítrea sobre o processo. Com a pesquisa observou – se que com a variação de temperatura alta, chegando a 70°C, que está acima da temperatura de transição vítrea, a taxa de degradação é rápida. As amostras que estavam inicialmente em estado elástico, a 40° C, sofreram transição para o estado vítreo. Essa análise permitiu concluir que a degradação do ácido ascórbico está extremamente relacionada à diferença entre as temperaturas do ar de secagem e da temperatura de transição vítrea.

A teoria de transição vítrea é uma das propostas para explicar o processo de encolhimento e colapso durante a secagem. No entanto, ela não é serve para todos os produtos (ZIELINSKA e MARKOWSKI, 2010). Ainda não se tem muitas informações na literatura abordando uma definição comum de colapso. Geralmente, o termo sido usado para descrever a perda de estrutura. O colapso é uma drástica diminuição da porosidade em produtos submetidos à secagem (YAN *et al.*, 2008).

vii) *Velocidade de secagem*

Quando o material é submetido a elevadas taxas de secagem, a umidade rapidamente diminui induzindo a superfície externa a perder sua mobilidade (transição vidro–borracha) o que acarreta a formação de uma crosta rígida e reduz o encolhimento, logo influenciando as transferências internas de massa, teoria descrita por KATEWAKA & SILVA (2007) e BATISTA (2004). Na situação oposta, quando forem utilizadas baixas taxas de secagem, o gradiente interno de teor de umidade não é acentuado, a difusão de água do interior para o exterior do material ocorre na mesma taxa que a evaporação na superfície, de modo que o material encolhe uniformemente até o fim da secagem formando um sólido denso (ACHANTA et al., 2001).

Dissa *et al.* (2010) observaram a formação de crostas em suas amostras, que restringiram a mobilidade da matriz e a levaram ao estado vítreo quando estudaram a secagem convectiva de *Spirulina* para conhecer um pouco mais sobre seu comportamento durante a secagem.

2.3.2 Modelos matemáticos

De acordo com Suzuki *et al.* (1976) a relação entre a retirada de umidade e a mudança de volume pode ser formulada de três diferentes maneiras:

- Modelo de Secagem Uniforme: o encolhimento (S_b) é igual ao volume de água perdida por evaporação durante todos os estágios de secagem;

$$S_b = \left(\frac{\rho_{s0}}{X_0 + 1} \right) X + \frac{X_0(1 - \rho_{s0}) + 1}{X_0 + 1} \quad (2-13)$$

Equação que depende do valor de umidade inicial e a massa específica inicial.

$$S_b = \frac{\left[X + X_{eq} \left(\frac{1}{\rho_{s,eq}} - 1 \right) + \frac{1}{\rho_{s,eq}} \right]}{\left[X_0 + X_{eq} \left(\frac{1}{\rho_{s,eq}} - 1 \right) + \frac{1}{\rho_{s,eq}} \right]} \quad (2-14)$$

onde é necessário o conhecimento da umidade de equilíbrio e massa específica do material.

- Modelo de Secagem Central (“core drying”): o centro do material continua com a mesma umidade do início do processo de secagem, enquanto na superfície do material uma camada seca é formada.

$$S_b = \left[\frac{(1-\zeta)}{(X_0 - X_{eq})} \right] X + \left[\frac{(\zeta X_0 - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})} \right] \quad (2-15)$$

- Modelo de Secagem Semicentral (“semi-core drying”): nesse caso, a camada seca possui uma densidade intermediária com valor entre as densidades inicial e do material seco.

$$S_b = \frac{(1-\zeta)}{\left[(X_0 - X_{eq}) - \gamma(\zeta X_0 - X_{eq} + \zeta - 1) \right]} X + \frac{\left[\zeta - \gamma(\zeta X_0 - X_{eq} + \zeta - 1) \right]}{\left[(X_0 - X_{eq}) - \gamma(\zeta X_0 - X_{eq} + \zeta - 1) \right]} \quad (2-16)$$

$$\text{em que: } \zeta = \rho_{s0} \frac{(1 + X_{eq})(1 + X_0)}{\rho_{seq}}$$

O encolhimento, apesar de ser considerado insignificante nas equações de balanço, para facilitar as soluções equacionais em diversos trabalhos na literatura, deve ser sempre levado em conta, pois pode afetar as propriedades físicas do material e também os fenômenos de transferência. A desconsideração dessa alteração volumétrica é uma das principais causas de erro no desenvolvimento de modelos matemáticos utilizados na simulação dos processos de secagem de alguns materiais. Torna-se notável que considerar o encolhimento é fundamental para uma descrição eficaz do processo de secagem (ZIELINSKA e MARKOWSKI, 2010).

Um dos mais recentes trabalhos encontrados que mostram a influência do encolhimento foi feito por Curcio e Aversa (2014), onde é formulado um modelo que permite prever as interações entre os fenômenos de transporte que governam o processo entre as fases existentes e evidenciar as modificações que podem surgir na geometria dos legumes submetidos a secagem por convecção.

A forma mais simples para modelar o encolhimento durante a desidratação é a obtenção de uma correlação empírica entre o encolhimento, teor de umidade e condições do processo.

Diversos tipos de modelos que predizem variação de volume estão disponíveis na literatura e podem ser usados.

Para explicar o encolhimento dos alimentos, usualmente têm-se adaptado modelos que foram desenvolvidos originalmente para suposição de encolhimento insignificante. Neles, a solução numérica da equação de transferência de calor e de massa permite a utilização tanto de propriedades variantes como constantes e o encolhimento pode ser incluído nos cálculos (DISSA *et al.*, 2008, BURMESTER e EGGERS, 2010; HERNANDEZ *et al.*, 2010; ZIELINSKA e MARKOWSKI, 2010; MILCZAREK *et al.*, 2011). Entretanto, deve-se lembrar que quando a forma do alimento não é regular, a utilização de correlações inadequadas a situação pode limitar significativamente a precisão do modelo (BERNSTEIN e NOREÑA, 2013).

Os modelos propostos na literatura para descrever o mecanismo do encolhimento foram classificados em dois grupos: modelos empíricos e fundamentais. Mayor e Sereno (2004) compararam esses modelos com dados experimentais para secagem de batata (LOZANO *et al.*, 1983 apud MAYOR e SERENO, 2004), lula (RAHMAN *et al.*, 1996 apud MAYOR e SERENO, 2004), cenoura (KROKIDA e MAROULIS, 1997 apud MAYOR e SERENO, 2004) e maçã (MOREIRA *et al.*, 2000 apud MAYOR e SERENO, 2004).

A utilização de modelos empíricos é conveniente na modelagem do encolhimento, com os dados experimentais do encolhimento conhecidos e para as condições de processo existentes. Esse modelo é obtido a partir da análise da regressão de dados do encolhimento em função do teor de umidade. Geralmente apresentam um bom ajuste aos dados experimentais, mas seu uso é limitado por causa de sua dependência das condições de secagem e características do material (AKIYAMA e HAYAKAWA, 2000; ITAYA *et al.*, 1995).

Os modelos fundamentais são baseados nas equações de conservação de massa e volume para cada fase, onde se torna necessária uma interpretação física da estrutura dos alimentos, para antever as mudanças na geometria do material nas diferentes fases durante a secagem (MAYOR *et al.*, 2004).

Kurozawa *et al.* (2012) avaliaram a relação entre a transição vítrea e encolhimento de mamão durante a secagem. A modelagem do encolhimento utilizada foi a proposta por Suzuki *et al.* (1976). Um modelo fundamental que relaciona as alterações causadas na área superficial das amostras e o teor de umidade em base seca.

$$\frac{A_p}{A_{p0}} = (aX + b)^n \quad (2-17)$$

em que, os parâmetros a e b são expressos como:

$$a = \frac{\rho_{s0}}{(1 + X_0)}$$

$$b = 1 + a - \rho_{s0}$$

Kurozawa *et al.* (2012) observaram que efeito da temperatura de secagem do ar foi significativo. A temperatura mais alta provocou um encolhimento maior, devido à mobilidade da matriz sólida. À temperatura mais baixa, o produto tornou – se mais rígido o que dificultou um pouco a redução do volume, tornando o encolhimento menor. Por fim, concluíram que o modelo considerando o encolhimento mostrou um resultado melhor se comparado ao modelo sem essa consideração.

O fenômeno de encolhimento tem sido relacionado à difusividade efetiva de água devido ao encurtamento da distância necessária para o movimento das moléculas, que, pode afetar a remoção de umidade do material, influenciando a taxa de secagem e textura (LÓPEZ e ALVARADO, 2007, JANJAI *et al.*, 2008, ZIELINSKA e MARKOWSKI; 2010, MILCZAREK *et al.*, 2011; THUWAPANICHAYANAN *et al.*, 2011). Isso mostra que existe uma dependência simultânea entre o encolhimento e secagem, ou seja, a secagem pode provocar o encolhimento e este, por sua vez, influencia o processo de secagem.

i) *Modelo difusivo considerando o encolhimento*

A lei de Fick serve de base para todos os cálculos de coeficiente de difusão de umidade em modelos teóricos aplicados para processos de secagem de alimentos, ela pode ser aplicada para materiais com diferentes geometrias Zielinska e Markowski, (2010) como os de Ponkham *et al.* (2012) para secagem de rodela de abacaxi a partir de radiação infravermelha combinada com convecção do ar e Brasiello *et al.* (2013) para a secagem de berinjela.

Quando existe a retração das partículas durante o processo, esse fenômeno deve ser considerado. Primeiramente a densidade de sólido seco (ρ_d) é substituída na Equação 2-18, como a massa de sólido seco é constante, a expressão passa a ser (Barbosa Neto *et al.*, 2014).

$$\frac{\partial(X/V_p)}{\partial t} = \nabla [D_{ef} \nabla (X/V_p)] \quad (2-18)$$

Sendo V_p o volume da partícula. Substituindo $\frac{X}{V_p} = X^*$ a equação torna – se:

$$\frac{\partial X^*}{\partial t} = \nabla [D_{ef}^* \nabla X^*] \quad (2-19)$$

A transferência de massa deverá então obedecer às seguintes condições inicial e de contorno:

$$CI: t = 0, X^* = \frac{X_0}{V_{p0}} \quad (2-20)$$

$$CC1: t > 0, r = 0, \frac{\partial X^*}{\partial r} = 0 \quad (2-21)$$

$$CC2: t > 0, r = R, X^* = \frac{X_{eq}}{V_{p,eq}} \quad (2-22)$$

Desse modo, a solução analítica passa a ser expressa por:

$$YR \equiv \frac{X/V_p - X_{eq}/V_{p,eq}}{X_0/V_{p0} - X_{eq}/V_{p,eq}} = \sum_{j=1}^N \frac{6}{(j\pi)^2} \exp \left[- (j\pi)^2 \frac{D_{ef}^*}{R_0^2} t \right] \quad (2-23)$$

sendo X, V a umidade e o volume das partículas em determinado tempo; X_0 e V_0 a umidade e volume iniciais; X_{eq} e V_{eq} a umidade e o volume das partículas ao atingirem o equilíbrio; D_{ef}^* é

a difusividade da partícula ao se considerar o encolhimento e R^2 é o raio das partículas ao longo do processo de secagem.

Zielinska e Markowski (2010) realizaram uma pesquisa onde um modelo matemático baseado na lei de Fick, foi usado a fim de estimar a difusividade efetiva das cenouras. Foi observado o efeito causado pela temperatura do ar sobre o processo de secagem e do fenômeno do encolhimento na difusividade efetiva.

Pinedo *et al.* (2010) aplicaram o modelo de difusão de Fick, considerando ou não o encolhimento, para descrever a cinética de secagem a vácuo de cenouras. Os resultados obtidos mostraram que os valores da difusividade efetiva sem considerar o encolhimento foram maiores que os obtidos para o processo de secagem que levam em consideração o encolhimento. O que revela que o fenômeno do encolhimento deve ser considerado para que a transferência de massa por difusão não seja superestimada.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DAS SEMENTES

A descrição adequada da secagem pode ser feita a partir da caracterização física das partículas e da avaliação da variação de suas propriedades ao longo do processo.

Para obter uma caracterização adequada que permita analisar o encolhimento das partículas e representar realisticamente os fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa durante secagem, foi feito um levantamento dos parâmetros de dimensão, forma e estrutura, tais como: dimensões, esfericidade, alongamento, circularidade, área projetada, diâmetro geométrico, diâmetro equivalente, diâmetro de Feret e densidade aparente das sementes, e os métodos utilizados para sua determinação.

2.4.1 Dimensões

As medidas de dimensões podem ser feitas de várias maneiras, a escolha dependerá da partícula a ser analisada. Medeiros (2004) mediu o diâmetro de grãos de feijão, a partir do volume de líquido deslocado, onde os grãos de feijão eram imersos em álcool etílico. O diâmetro equivalente foi calculado a partir da equação:

$$d_p = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3} \quad (2-24)$$

Em que V_p é o volume de líquido deslocado por um grão ou semente (m^3); d_p é o diâmetro do grão (diâmetro da esfera de igual volume) (m).

Na literatura é possível encontrar algumas pesquisas onde os tamanhos das partículas são medidos de maneira mais simples como por meio paquímetro e micrômetro, com os três principais eixos da partícula sendo medidos.

Ixtaina *et al.* (2008) avaliaram as propriedades físicas das sementes de chia (*Salvia hispânica* L.) e a partir de sementes selecionadas aleatoriamente determinaram suas dimensões (comprimento, a, largura, b e espessura, c) utilizando um micrômetro digital. O diâmetro geométrico médio das partículas foi então calculado usando a seguinte expressão (MOHSEIN, 1970):

$$d_g = (abc)^{1/3} \quad (2-25)$$

Siqueira *et al.* (2012) ao caracterizar frutos de pinhão-manso durante o processo de secagem, em diferentes temperaturas, também utilizou expressões propostas por Mohsenin (1986) para obter cálculos como o valor de diâmetro geométrico médio, considerando o fruto com formato esferoidal.

Delgado *et al.* (2014) analisou o comportamento de dois tipos de castanha durante a secagem, para obter os valores das três dimensões axiais das partículas (comprimento, a, largura, b e espessura, c) foi utilizado o paquímetro.

2.4.2 Esfericidade

Algumas das técnicas para determinar o fator de forma são as de projeção de imagem e picnometria. Da mesma forma que as outras características, existem várias formas para definir a esfericidade. Segundo Mohsenin (1978), ela pode ser calculada pela razão entre o diâmetro

do círculo inscrito na projeção do objeto em repouso (d_i) e do diâmetro do círculo circunscrito na projeção do objeto em repouso (d_c):

$$\phi = \frac{d_i}{d_c} \quad (2-26)$$

Para partículas que possuem um volume semelhante a um elipsoide existe uma definição onde (MOHSENIN, 1970):

$$\phi = \left(\frac{\text{volume do sólido}}{\text{volume da esfera circunscrita}} \right)^{1/3} = \left[\frac{(\pi / 6) abc}{(\pi / 6) a^3} \right]^{1/3} = \left(\frac{bc}{a^2} \right)^{1/3} \quad (2-27)$$

$$\phi = \left(\frac{\text{diâmetro geométrico}}{\text{comprimento}} \right)^{1/3} = \frac{(abc)^{1/3}}{a} \quad (2-28)$$

em que: a, b, c são comprimento, largura e espessura.

Yalçın *et al.* (2007) analisaram as propriedades físicas de ervilha (*Pisum sativum*). As dimensões lineares (comprimento, largura e espessura) das sementes foram determinadas para que com esses valores obtidos a esfericidade (ϕ) das partículas com base na expressão proposta por (MOHSENIN, 1970):

Ixtaina *et al.* (2008) avaliaram as propriedades físicas das sementes de chia (*Salvia hispânica* L.). A esfericidade das sementes foi determinada pela razão entre o diâmetro equivalente das sementes considerando-as esféricas e o seu comprimento:

$$\phi = \frac{dp}{a} \quad (2-29)$$

Ramos *et al.*, (2004) avaliaram a variação nas propriedades dos tecidos da uva durante o processo de secagem utilizando a análise de imagens. A análise de imagens permite obter parâmetros de tamanho e forma das partículas de uma maneira mais rápida e precisa, pois é um

método direto e não destrutivo. Algumas das características obtidas por análise de imagens são: alongamento, circularidade, área projetada, perímetro, diâmetros máximo e mínimo, diâmetro de Feret, entre outras.

A circularidade (C), o alongamento (ζ) e o fator de forma (φ) são parâmetros que também estão relacionados com a forma do material, podendo ser calculados pelas seguintes equações:

$$C = \frac{4\pi A_{proj}}{P^2} \quad (2-30)$$

$$\zeta = \frac{L_{min}}{L_{max}} \quad (2-31)$$

$$\varphi = \frac{dF}{L_{max}} \quad (2-32)$$

sendo A a área projetada e P o perímetro da partícula projetada, L_{min} e L_{max} , os comprimentos do menor e maior eixo, respectivamente, e dF , o diâmetro de Feret médio.

Um produto com forma perfeitamente esférica terá circularidade e fator de forma 1,0, enquanto formas mais alongadas possuem valores de circularidade que tendem a se aproximar de zero.

Flores *et al.* (2011) também utilizaram técnicas de microscopia e análise de imagens para avaliar algumas propriedades físicas de sementes de mamona (*Ricinus communis*), as quais foram consideradas como elipsóides. A partir da análise de imagens foram obtidas medidas de comprimento, área, perímetro, maior diâmetro e circularidade. As técnicas utilizadas pelos autores se mostraram eficazes para a caracterização da macro e microestrutura das sementes.

2.4.3 Massa específica

Através da medida da massa e volume a amostra é possível determinar a massa específica por picnometria. Existem dois tipos de massa específica para materiais porosos como grãos e sementes:

- Massa específica real: razão entre a massa da amostra e o volume da estrutura sólida.

$$\rho_s = \frac{m}{V_s} \quad (2-33)$$

- Massa específica aparente: razão entre a massa da amostra e o volume total ocupado pela partícula.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_{ap}} \quad (2-34)$$

Na literatura se encontram vários métodos utilizados para a determinação das massas específicas de grãos e sementes. Ruffato *et al.* (1999) pesquisaram sobre a influência do processo de secagem em camada fina sobre as massas específicas real e aparente e a porosidade de milho-pipoca. A partir dos valores obtidos foi observado que as massas específicas diminuem com o aumento do teor de umidade, enquanto a porosidade da massa granular aumenta.

Siqueira *et al.* (2012) avaliaram as propriedades físicas das sementes de pinhão-mansão ao longo da secagem em diferentes temperaturas. Como para a maioria dos produtos agrícolas a pesquisa mostrou que com a redução do teor de umidade ocorre a redução da massa específica aparente do material.

2.5 QUALIDADE DAS SEMENTES

2.5.1 Viabilidade Fisiológica

Os fenômenos que ocorrem durante o processo de secagem, bem como condições operacionais inadequadas podem afetar de forma negativa a qualidade do produto desidratado. Dentre os fatores que caracterizam a qualidade das sementes estão a viabilidade fisiológica e a coloração destas.

Testes de viabilidade fisiológica e atributos de cor são necessários para completar as informações acerca do processo de secagem, com o objetivo de avaliar se o método utilizado

para a retirada de umidade das sementes é realmente eficaz, não causando danos as qualidades do produto.

A germinação é na verdade o crescimento do embrião, resultando na ruptura do revestimento da semente (tegumento) e o aparecimento de uma nova planta. Os fatores que influenciam a germinação são: umidade, temperatura, incidência da luz, salinidade e qualidade do solo (KOZLOWSKI & PALLARDY, 1997).

Durante o processo de secagem, o emprego de temperaturas muito altas pode favorecer um aquecimento excessivo das sementes, ocasionando rachaduras no tegumento, pericarpo e perda da viabilidade. Esses danos podem manifestar-se ainda durante a secagem ou durante o período de armazenamento, reduzindo a qualidade fisiológica do produto (Funguetto, 2003). A suscetibilidade das sementes a esses danos varia de acordo com a espécie e cultivar das sementes, além da temperatura e umidade inicial destas (JÚNIOR & CORRÊA, 2000).

Vários autores relatam a aplicação de testes para avaliar e quantificar a qualidade fisiológica das sementes, após o processo de secagem. (SARATH, 2013) afirma que o elevado teor de óleo presente nas sementes de amendoim, causam a desintegração das membranas devido a peroxidação de lipídeos, ocasionando danos a qualidade das sementes. Entretanto Miamoto *et al.* (2010) avaliaram o vigor de lotes de sementes de *Moringa oleífera* L. que também possuem grande quantidade de lipídeos e concluíram que essas possuem grande resistência a fatores externos, podendo manter sua qualidade fisiológica por um ano.

Moncaleano-Escadoni *et al.*, (2013) realizaram o estudo sobre os efeitos do armazenamento sobre a germinação de sementes de *Jatropha curcas*. Suas análises evidenciaram que essas possuem curto período de viabilidade (aproximadamente 6 meses) e que temperaturas elevadas diminuem seu poder de germinação.

Para avaliar a qualidade fisiológica das sementes, podem ser realizados diferentes testes, como: o teste padrão de germinação (TPG), que é realizado em ambiente controlado, para não expor as sementes à condições adversas e é bastante eficiente para avaliar o vigor das sementes, com base no desempenho de plântulas; o teste de tetrazólio que fornece informações sobre os danos mecânicos e deterioração das sementes e o teste de envelhecimento acelerado identifica diferenças de vigor e estima o potencial de conservação das sementes (SARATH, 2013).

2.5.2 Atributos de cor

As características físicas, bem como a cor das sementes são atributos que influenciam na sua aceitação. O escurecimento do tegumento geralmente é associado ao envelhecimento, sendo então considerada uma característica desfavorável. Desse modo a avaliação da cor é um parâmetro importante para avaliação da qualidade das sementes.

As características físicas, bem como a cor das sementes são atributos que influenciam na sua aceitação. O escurecimento do tegumento geralmente é associado ao envelhecimento, sendo então uma característica considerada desfavorável. Desse modo a avaliação da cor é um parâmetro importante para avaliação da qualidade das sementes.

A Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) estabeleceu o um sistema para caracterizar as cores de forma objetiva o Lab Onde a cor é representada em coordenadas tridimensionais, através da luminosidade (L^*), verde-vermelho (a^*) e amarelo-azul (b^*). Os valores de (L^*) podem variar do 0 que indica o preto, até 100 chegando no branco, valores negativos do (a^*) indicam coloração verde e positivos definem o tom de vermelho, já leituras negativas do (b^*) indicam a coloração amarela enquanto valores positivos nos direcionam para o azul (KORIFI *et al.*, 2013).

A variação da coloração pode ser avaliada através de Computer Vision System (CVS) devidamente calibrado com o uso de cores padrão. Esse método é realizado com um sistema de iluminação, uma câmera digital e um software para análise de imagens, que irá converter as imagens RGB nos parâmetros L^* , a^* e b^* . Porthula *et al.* (2015) avaliaram a mudança de coloração da beterraba durante a secagem, através do (CVS), onde observaram uma mudança de cor mais lenta nas amostras com maior quantidade de sólidos solúveis. Laverde *et al.* (2013) avaliaram os efeitos do teor de umidade sobre os atributos de cor em fatias de morango através do (CVS), onde observaram que o escurecimento do produto estava relacionado com a diminuição da luminosidade L^* e aumento da tonalidade amarela b^* .

A colorimetria também é um método capaz de avaliar as mudanças dos atributos de cor. A utilização desse método tem sido muito relatada na literatura para avaliar os parâmetros de cor em produtos submetidos a diferentes processos de secagem.

Tasirin *et al.* (2014) avaliaram o escurecimento de folhas de limão submetidas a três diferentes processos de secagem (ao sol, estufa e em leito fluidizado). A leitura dos parâmetros

de cor tridimensional (L^* , a^* e b^*) foram realizadas com uso de um colorímetro portátil. A análise da mudança de coloração das amostras foi realizada com base na seguinte expressão:

$$\Delta E^* = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2} \quad (2-35)$$

sendo a^* , b^* e L^* parâmetros que representam a cor em escalas de vermelho–verde, amarelo–azul e branco–preto, respectivamente.

Foi observado que o maior tempo de secagem acarretou uma diferença na coloração das folhas, tornando-as mais escuras. Dentre os três processos, o realizado em leiteo fluidizado proporcionou as amostras um valor de L^* próximo ao das folhas frescas, ou seja, acarretou uma menor degradação da cor.

A cinética de secagem e análise dos atributos de cor das folhas de Moringa oleífera foram abordados no trabalho de Ali *et al.* (2014). Os parâmetros de cor foram obtidos a partir de leitura realizada com o uso de um colorímetro devidamente calibrado. Foram utilizadas três condições de temperatura, 40, 50 e 60°C. No trabalho foi relatado que quanto maior a temperatura da secagem, maiores foram os valores de b^* indicando a degradação da clorofila presente nas folhas, tornando-as amareladas.

Kahyaoglu & Kaya (2006) avaliaram as mudanças decorrentes do tempo e temperatura no teor de umidade, cor e textura de sementes de gergelim submetidas a secagem. As medidas de cor foram realizadas com colorímetro, e o índice de escurecimento (IE) calculado a partir da Equação 2 – 36:

$$IE = \frac{[100(x - 0,31)]}{0,17} \quad (2 -36)$$

onde:

$$x = \frac{(a^* + 1,75L^*)}{(5,645L^* + a^* - 3,012b^*)} \quad (2 -37)$$

Inicialmente houve um aumento na luminosidade das sementes, que diminuiu durante o processo de secagem. Já o aumento da temperatura e tempo de processo proporcionaram um aumento das tonalidades vermelha e amarela das sementes, devido a degradação de fosfolipídios. O (*IE*) se manteve constante durante a secagem a 120°C, entretanto nas temperaturas mais altas 150 e 180°C após o período de 90 minutos houve um aumento significativo no seu valor, indicando o escurecimento das amostras.

Sledz *et al.* (2015) avaliaram a variação dos atributos de cor das folhas de salsa submetidas a secagem com o uso de um colorímetro de bancada. Foi observada que o menor tempo de secagem e o pré-tratamento das amostras proporcionou uma maior resistência dos pigmentos verdes e preservam os componentes bioativos contra a degradação.

As alterações da cor das folhas de erva cidreira (*Melissa officinalis* L.) durante o processo de secagem foram investigadas por Argyropoulos & Müller (2014). À medida que a umidade diminuiu, os tons de vermelho aumentaram enquanto os de amarelo diminuíram gradualmente até que a umidade chegasse ao equilíbrio. O aumento da temperatura também provocou alteração na cor dessas folhas, devido à oxidação enzimática que acarretou um escurecimento das folhas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, equipamentos e metodologia utilizados para caracterizar fisicamente as sementes de moringa e estudar sua secagem, incluindo desde a determinação da cinética de secagem até a avaliação do fenômeno de encolhimento das partículas, do consumo de energia do processo e de sua influência sobre atributos de qualidade do produto.

3.1 MATERIAIS

No presente trabalho foram utilizadas sementes de *Moringa oleífera in natura* (Figura 3-1) em estágio de maturação fisiológica, que é o momento mais indicado para a colheita, pois as sementes estão com máximo potencial de germinação e vigor (VIERA, 2004) e possuem um alto teor de umidade, necessitando dessa forma, serem submetidas a um processo de secagem para evitar a proliferação de microrganismos e sua indesejável fermentação.



Figura 2-1 Sementes de *Moringa oleífera in natura*

3.2 EQUIPAMENTO

O estudo experimental sobre a secagem de sementes de moringa foi conduzido em secador infravermelho da marca Quimis (modelo Q333D – 2), conforme esquematizado na Figura 3-2. O sistema possui uma lâmpada incandescente de 250 W (1) que emite raios infravermelhos, plataforma para colocação da amostra de partículas (2), um seletor (3) para regular a potência da lâmpada e um termopar instalado próximo à lâmpada e acoplado a um indicador digital de temperatura (4) para monitoramento da temperatura da fonte de aquecimento IV.

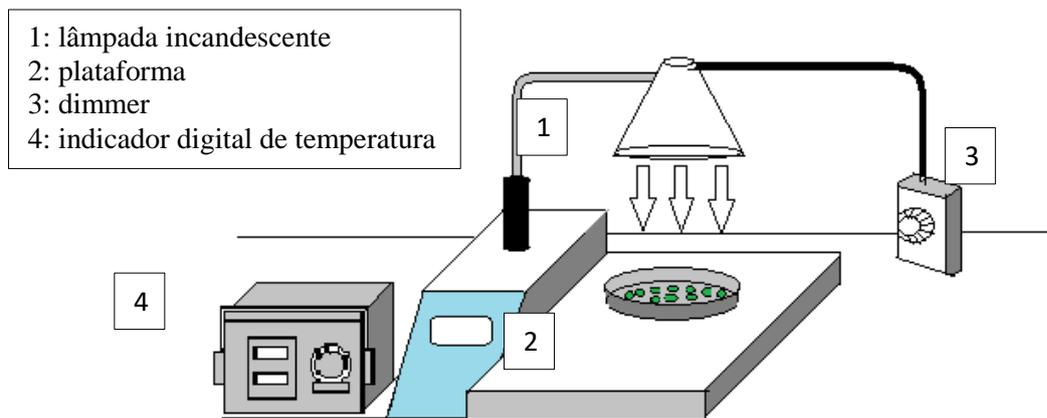


Figura 2-2 Esquema do secador infravermelho.

A escolha do secador via radiação infravermelha como unidade experimental utilizada no trabalho, se deve ao fato das sementes em estudo serem oleaginosas e com isso possuírem uma alta banda de absorção na região do IV.

3.3 METODOLOGIA

Neste item, todos os métodos utilizados para a realização da parte experimental do estudo são descritos. Os procedimentos adotados para a coleta, caracterização das sementes,

secagem, posterior avaliação do encolhimento e cor, além dos testes de viabilidade de germinação encontram-se detalhados, bem como o tratamento e análise dos dados.

3.3.1 Coleta dos frutos

Amostras das vagens da *Moringa oleífera* utilizadas neste estudo, mostradas na Figura 3-3, foram coletadas de árvores localizadas na cidade de Arara, interior do estado da Paraíba.



Figura 2-3: Vagens da *Moringa oleífera* Lam.

A seleção das vagens de *Moringa oleífera* foi realizada considerando características visuais como a integridade física satisfatória e coloração esverdeada. Houve o cuidado, portanto, de não selecionar vagens já desidratadas pela exposição ao sol na árvore.

A colheita foi realizada de maneira direta, em seguida as vagens foram abertas para a retirada das sementes como apresentadas na Figura 3-4 (a). Em uma parte do lote de sementes, somente a valva de cada semente foi removida com uso de uma tesoura (b), enquanto na outra procedeu-se à remoção manual do tegumento com o auxílio de um estilete (c).

Logo em seguida, amostras das sementes com e sem tegumento, foram submetidas à caracterização física, em termos de suas dimensões, peso e teor de umidade, cuja metodologia será descrita a seguir.



Figura 2-4: Sementes de moringa. (a) retiradas da vagem, (b) após corte das valvas, (c) sem tegumento.

As sementes restantes foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em freezer até seu uso nos experimentos de secagem.

3.3.2 *Caracterização das sementes*

Inicialmente, foram selecionadas randomicamente 238 sementes com tegumento para realização da caracterização física. Por meio de um paquímetro digital (DIGIMESS, modelo 13101–25, precisão de 10^{-3} mm), foram medidas as dimensões das partículas, comprimento (a), largura (b) e espessura (c), conforme esquematizado na Figura 3-5. Em seguida, cada uma das sementes foi pesada numa balança analítica (Shimadzu, modelo AUX 220, precisão $1,0 \times 10^{-7}$ kg). Com essas informações traçou-se um gráfico com a distribuição do tamanho das sementes de moringa com tegumento.

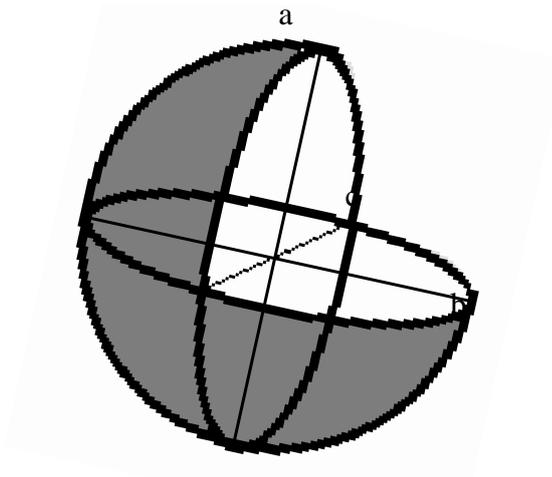


Figura 2-5: Formato das sementes da *Moringa oleífera*.

O tegumento de cada semente foi, então, removido, e as dimensões e massa das partículas obtidas foram também medidas.

A partir dos valores obtidos das dimensões dos eixos ortogonais, foi possível calcular o diâmetro geométrico médio (D_g) e a esfericidade (ϕ) utilizando as Equações 2-25 e 2-28, respectivamente, de acordo com Mohsenin (1986). Considerando, inicialmente, as sementes de *Moringa oleífera* como elipsóides, o volume dessas partículas foi determinado pela seguinte equação:

$$V_p = \frac{\pi}{6}(abc) \quad (3.1)$$

Sendo a, b e c o comprimento, largura e espessura, respectivamente.

O teor de umidade inicial do material foi determinado pelo método da estufa à $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ por 24 horas (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 1992).

3.3.3 Experimentos de secagem infravermelho

Os experimentos de secagem via radiação IV foram realizados na unidade esquematizada na Figura 3-2. A distância entre a fonte de aquecimento IV e a monocamada de partículas foi fixada em 20 cm. Os testes de secagem das sementes de moringa com e sem tegumento foram conduzidos com temperaturas da fonte IV de 90, 120 e 160°C.

Três grupos de experimentos foram realizados. O objetivo do primeiro grupo foi determinar a cinética de secagem das sementes com e sem tegumento. O segundo grupo teve como objetivo identificar e quantificar o encolhimento das partículas expostas à radiação IV, enquanto o terceiro grupo teve como objetivo avaliar e comparar os atributos de cor das sementes com e sem tegumento durante o processo de secagem. Em todos os grupos, o consumo de energia do processo foi medido. Cada experimento e subsequente análise foram realizados em duplicata.

Inicialmente o equipamento foi ligado e o seletor regulado para que o sistema de aquecimento infravermelho atingisse a temperatura desejada. Após a estabilização do sistema térmico, uma bandeja de alumínio de 13 cm de diâmetro, contendo uma monocamada de partículas (aproximadamente, 80 sementes com tegumento ou 100 sementes sem tegumento), como apresentada na Figura 3-6, foi colocada sob a fonte de aquecimento IV, dando início ao processo de secagem.

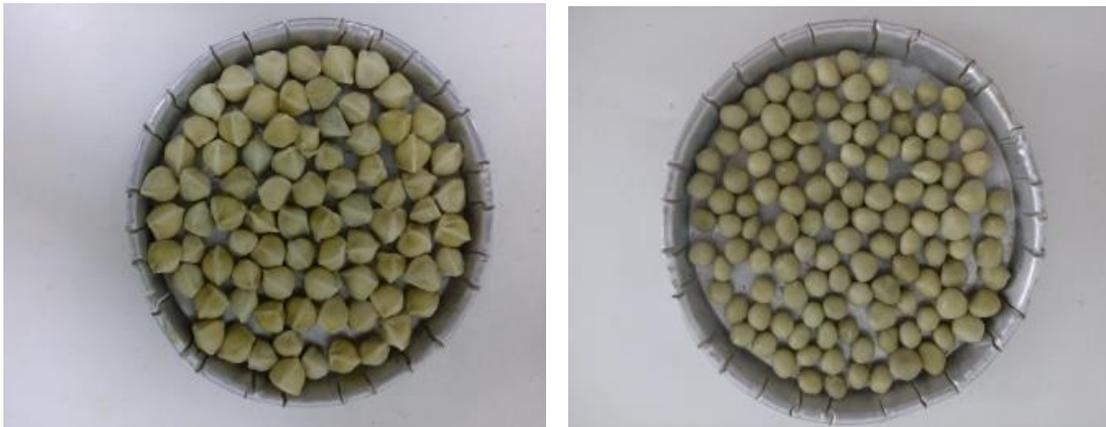


Figura 2-6: Sementes da *Moringa oleifera* com e sem tegumento, respectivamente

Para a determinação das curvas de cinética de secagem do material, em intervalos de tempo pré-determinados a temperatura da superfície das sementes foi medida de forma direta com o uso de um pirômetro óptico digital (Impac, precisão 0,1°C) e a massa da bandeja contendo as sementes pesada em balança analítica (Shimadzu, modelo AUX 220), com precisão de $1,0 \times 10^{-7}$ kg. A pesagem da amostra durava entre 10 e 15 s. Ao final de cada experimento, a massa de sólido seco foi determinada pelo método direto da estufa, com temperatura de (105

± 3)°C por 24 horas (BRASIL, 2009), tendo em vista o cálculo do teor umidade das sementes durante o processo.

Nos testes de secagem realizados para a caracterização do encolhimento, além das medidas da temperatura da superfície das sementes e das pesagens das amostras, foram capturadas, por meio de uma câmera digital, imagens das sementes durante o processo para posterior análise de imagens. Os tempos do processo nos quais as sementes foram removidas para a tomada de imagens foram definidos com base nas curvas de secagem previamente determinadas.

Nos testes de secagem conduzidos para a avaliação de atributos de qualidade das sementes, em tempos pré-determinados, também com base nas curvas de secagem, foram realizadas análises das alterações de cor do produto exposto à radiação IV utilizando um colorímetro digital portátil (MiniScan EZ, modelo 4500L). E ao término do processo, foi avaliada a viabilidade das sementes pelo teste do tetrazólio.

3.3.4 Caracterização e análise do encolhimento

A variação das dimensões das sementes durante o processo de secagem foi caracterizada a partir da análise de imagens. As sementes de moringa foram expostas à radiação IV por diferentes períodos de tempo para atingir o teor de umidade desejado, com as curvas de secagem previamente determinadas facilitando a determinação do tempo de secagem. A o atingir o tempo de secagem pré-determinado, as sementes foram retiradas do secador e sua imagem capturada utilizando uma câmera digital. O esquema utilizado para a captura das imagens das sementes é apresentado na Figura 3-7.

Para a tomada das fotos, as sementes foram colocadas em uma plataforma (1) que possui uma régua graduada (2), uma lâmpada no seu interior que era ligada antes da retirada das fotos, um suporte (3) onde era colocada a câmera digital (4). As imagens capturadas ao longo do processo de secagem foram analisadas utilizando o software Image Pró - Plus[®]. A Figura 3-8 ilustra uma das imagens capturadas para análise.

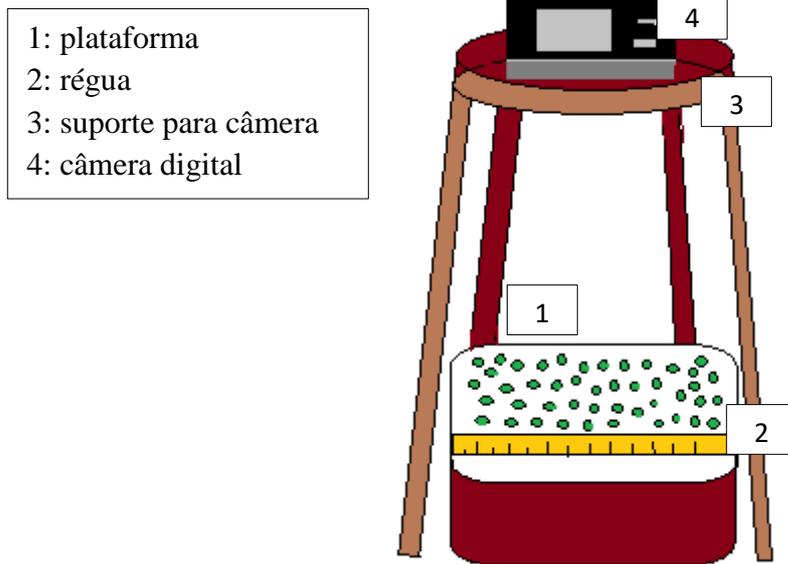


Figura 2-7: Aparato para realização da captura de fotos das sementes de moringa.

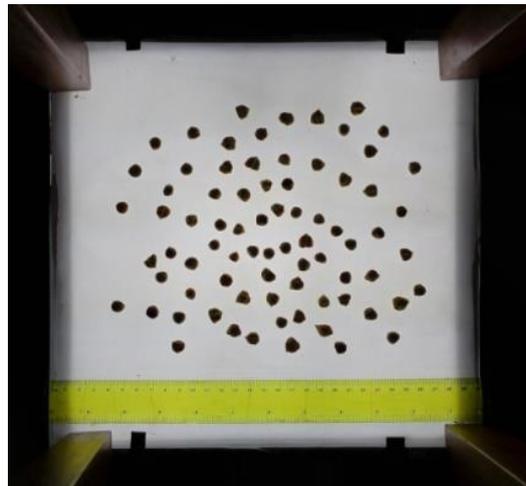


Figura 2-8: Foto das sementes de moringa com tegumento retirada em tempos pré-determinados com auxílio de câmera digital, durante a realização do processo de secagem a $T_{IR} = 90^{\circ}\text{C}$.

Os seguintes parâmetros de tamanho foram determinados utilizando o software acima especificado: a área projetada da partícula (A_{proj}), perímetro (P), comprimento máximo (L_{max}) e mínimo (L_{min}), diâmetros máximo (d_{max}) e mínimo (d_{min}), diâmetros de Feret máximo (dF_{max}), mínimo (dF_{min}) e médio (dF). Também foram obtidos os parâmetros de forma circularidade (C), alongamento (ζ) e fator de forma (φ) das partículas definidos como (RAMOS *et al.*, 2004):

$$C = \frac{4\pi A_{proj}}{P^2} \quad (2-30)$$

$$\zeta = \frac{L_{min}}{L_{max}} \quad (2-31)$$

$$\varphi = \frac{dF}{L_{max}} \quad (2-32)$$

Em relação à geometria das sementes de moringa, verificou-se que tanto as com tegumento como as sem tegumento se assemelham a esferóides oblatos. Logo, o volume e a área superficial de cada partícula foram calculados a partir das seguintes equações:

$$V_p = \frac{\pi}{6} d_{max}^2 d_{min} \quad (2-2)$$

$$A_p = \frac{\pi}{2} d_{max}^2 + \left(\frac{\pi d_{min}^2}{4e} \right) \ln \left(\frac{1+e}{1-e} \right) \quad (2-3)$$

sendo e a excentricidade obtida pela equação:

$$e = \left[1 - \left(\frac{d_{min}}{d_{max}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2-4)$$

De posse do volume calculado de uma partícula individual, do número de sementes presentes na amostra e da massa desta (quantificada em uma balança analítica com precisão 10^{-7} kg), calculou-se também a densidade aparente das sementes, a fim de avaliar as alterações induzidas pelo encolhimento nessa propriedade estrutural das sementes.

O diâmetro da esfera equivalente de mesmo volume que a partícula (d_p) foi calculado pela Equação 2-24. A esfericidade das sementes ao longo do processo foi obtida a partir da equação:

$$\phi = \frac{d_p}{d_{\max}} \quad (2-5)$$

As características de encolhimento das partículas nos dois diferentes tratamentos (com e sem tegumento) foram avaliadas, inicialmente, através de curvas de diâmetro equivalente e esfericidade em função do teor de umidade em base seca.

O encolhimento durante a secagem foi quantificado a partir das alterações de volume e área superficial das partículas, as quais foram calculadas com base nas suas dimensões medidas por análise de imagens. O fenômeno foi avaliado com base nas razões de encolhimento volumétrico e superficial, (V_p/V_{p0}) e (A_p/A_{p0}), respectivamente, plotadas em função do adimensional de umidade, constituindo as chamadas curvas de encolhimento.

Também foram analisadas as variações do volume das sementes, com e sem tegumento, em função do volume de água removida. As alterações nas propriedades estruturais dessas partículas foram avaliadas em termos da densidade aparente em função da umidade adimensional.

Deve ser ressaltado que a análise do encolhimento com base nas alterações de volume e área, a partir de medidas geométricas, foi suficientemente preciso, à medida que as sementes de moringa mantiveram praticamente sua forma original ao longo de todo o processo de secagem.

3.3.5 Análise da cinética de secagem

Os dados cinéticos de secagem foram inicialmente expressos em termos da temperatura e teor de umidade da partícula em função do tempo. A partir dos dados de teor de umidade em função do tempo, os valores de taxa de secagem ($-dX/dt$) foram obtidos por derivação numérica, utilizando o software OriginPro[®] 8. A densidade de fluxo de umidade foi então calculada utilizando a seguinte equação:

$$N_w = -\frac{m_{ss}}{A_p} \frac{dX}{dt} \quad (2-6)$$

onde N_w é a densidade de fluxo de umidade ($\text{kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ min}^{-1}$), m_{ss} é a massa de sólido seco (kg), A_p é a área de transferência (m^2), X é o teor de umidade em base seca (kg água/kg sólido seco) e t é o tempo de secagem (min).

Os teores de umidade obtidos na faixa de temperaturas investigada foram também convertidos em valores do adimensional de umidade (XR), definido como a razão entre o teor de umidade livre num dado tempo e o teor de umidade livre inicialmente disponível, expresso como:

$$XR \equiv \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (2-7)$$

onde X é o teor de umidade num dado tempo (kg água/kg sólido seco), X_0 e X_e são os teores de umidade inicial e de equilíbrio termodinâmico, respectivamente. Admitindo que a prolongada exposição do material à radiação IV levaria à completa remoção de sua umidade, X_e foi considerado zero, de acordo com Fasina *et al.* (2001).

A influência das alterações na área de transferência induzidas pelo encolhimento sobre as características de secagem IV foi analisada através de curvas da densidade de fluxo de umidade para as sementes com e sem tegumento em função do teor de umidade em base seca. Foram ainda analisadas a influência da temperatura e da remoção da casca a partir de curvas da umidade adimensional e temperatura da superfície das sementes em função do tempo e da densidade de fluxo de umidade das sementes com e sem tegumento em função da umidade adimensional.

i) *Determinação das difusividades mássicas efetivas das sementes expostas à radiação IV*

A transferência de massa durante a secagem IV das sementes de moringa foi analisada em termos da difusividade efetiva, a qual foi determinada em cada temperatura da fonte IV ao aplicar o modelo difusivo para descrever o período de fluxo de umidade decrescente,

primeiramente negligenciando o fenômeno de encolhimento e depois levando em consideração a contração de volume das partículas.

A solução analítica do modelo difusivo em coordenadas esféricas, negligenciando o encolhimento das partículas durante a secagem, considerando processo isotérmico, difusividade efetiva constante e condições de equilíbrio na superfície da partícula, é descrita pela Equação 2-10:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \sum_{j=1}^N \frac{6}{(j\pi)^2} \exp\left[-(j\pi)^2 \frac{D_{ef}}{R_0^2} t\right] \quad (2-10)$$

Ao incorporar a variação do volume das sementes durante a remoção de umidade, a solução é descrita pela Equação 2-23:

$$YR \equiv \frac{X/V_p - X_{eq}/V_{p,eq}}{X_0/V_{p0} - X_{eq}/V_{p,eq}} = \sum_{j=1}^N \frac{6}{(j\pi)^2} \exp\left[-(j\pi)^2 \frac{D_{ef}}{R_0^2} t\right] \quad (2-23)$$

As Equações 2-10 e 2-23, truncadas no quinto termo de cada série, foram ajustadas, respectivamente, aos dados experimentais expressos em termos de XR e YR em função do tempo, para sementes com e sem tegumento. O procedimento de regressão não linear foi aplicado para estimar os parâmetros dos modelos, utilizando o programa STATISTICA[®] versão 7. A dependência da difusividade mássica efetiva com a temperatura foi investigada ao plotar os valores obtidos em função da temperatura do produto. As tendências foram inspecionadas visualmente e uma equação apropriada ajustada aos dados.

ii) *Discriminação das equações semiempíricas de secagem*

As equações semi-empíricas de Lewis, Page e Brooker, Equações 2-1, 2-2, 2-3, respectivamente, foram ajustadas aos dados experimentais para descrever as curvas de secagem IV em camada fina das sementes de moringa.

Os ajustes foram realizados por regressão não-linear, através do método dos mínimos quadrados Quasi-Newton, no programa STATISTICA[®] versão 7. Para selecionar a equação mais adequada para representar o processo de secagem IV foram avaliados os seguintes critérios

estatísticos: coeficiente de determinação (R^2) e desvio relativo médio (DRM), que foi calculado a partir da equação:

$$DRM(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(y_{exp} - y_{sim})}{y_{exp}} \cdot 100 \quad (3-8)$$

3.3.6 Consumo de energia do processo

O desempenho do secador infravermelho foi avaliado com base no consumo de energia específica, o qual foi determinado em cada condição de secagem, a partir da equação:

$$E_e = \frac{q_{IV} A \Delta t}{m_w} \quad (2-9)$$

sendo E_e a energia específica em MJ/kg, q_{IV} o fluxo de energia radiante em W/m^2 , A a área exposta à radiação, t o tempo de secagem em s e m_w a massa de água removida em kg.

A energia específica calculada correspondeu à energia requerida para reduzir a umidade inicial das sementes até um valor considerado seguro para o armazenamento, 0,10 b.u.

De acordo com a lei de Stefan–Boltzmann, o fluxo de energia radiante da fonte é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta:

$$q_{IV} = \sigma T_f^4 \quad (2-10)$$

onde σ é a constante de Stefan–Boltzmann ($56,7 \times 10^{-12} \text{ kW/m}^2 \text{ K}^4$) e T_f , a temperatura da fonte.

A eficiência energética foi calculada como a razão entre a energia utilizada para vaporizar a umidade contida nas sementes e o total de energia fornecida pela fonte de aquecimento IV, conforme a equação:

$$\eta = \frac{m_w \lambda_s}{q_{IV} A \Delta t} \quad (2-11)$$

onde λ_s é o calor de dessorção de umidade na semente.

Como a equação para o calor de dessorção de umidade para sementes de moringa não se encontra disponível na literatura, realizou-se uma análise termodinâmica para determinar a energia útil, correspondente àquela efetivamente envolvida na vaporização da umidade. Para tanto, partiu-se da equação de Clayperon:

$$\Delta H^{vap} = T \Delta V^{LV} \frac{dP^{vap}}{dT} \quad (2-12)$$

a qual permite, considerando $T = T_{semente}$, o cálculo da entalpia da vaporização a partir da curva de pressão de vapor e dos volumes específicos das fases vapor e líquida.

Para o cálculo do volume na fase vapor da água foi empregada a equação cúbica de estado de Peng-Robinson (SANDLER, 1999):

$$Z = \frac{V^V}{V^b - b} - \frac{a\alpha(T)}{RT} \left[\frac{V^V}{V^V (V^V + b) + b(V^V - b)} \right] \quad (2-13)$$

Onde:

$$a = 0,457124 \frac{R^2 T_c}{P_c} \quad (3-14)$$

$$b = 0,07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (3-15)$$

$$\alpha(T) = \left[1 + k(1 - T_r^{1/2}) \right] \quad (3-16)$$

$$k = 0,37464 + 1,54226\omega - 0,26992\omega^2 \quad (3-17)$$

onde w (fator acêntrico) = 0,334.

O volume na fase líquida (V^L) foi calculado pela equação de Rackett:

$$V^L = \frac{RT_c}{P_c} Z_{RA}^{[1+(1-T_r)^{2/7}]} \quad (2-18)$$

cujos parâmetros para água são T_c (Temperatura crítica) = 674, 4K; P_c (Pressão crítica) = 22,12MPa; R (constante dos gases ideais) = 8,31J/mol·K. A Temperatura reduzida foi calculada através da equação:

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (3-19)$$

A pressão de vapor (kPa) em função da temperatura (K) atingida pela semente ao longo do processo de secagem foi calculada pela equação de Antoine:

$$\ln P^{vap} = A - \frac{B}{T + C} \quad (2-20)$$

cujos parâmetros para a água são $A = 16,288$; $B = 3816,44$ e $C = -46,13$.

Com a evolução da temperatura da semente durante a secagem e o cálculo da pressão de vapor, foi possível obter dP^{vap}/dT e determinar a entalpia de vaporização (ΔH^{vap}), em J/mol. Com a variação de umidade, obteve-se a quantidade de água evaporada (em mols), e a potência útil calculada a partir da equação:

$$P_{\text{útil}} = \frac{n\Delta H^{vap}}{\Delta t} \quad (2-21)$$

em que n (nº de mols) foi obtido conforme a seguinte equação:

$$n = \frac{m}{MM} \quad (3-22)$$

Sendo m a massa de água evaporada em gramas e MM (massa molar da água) = 18g/mol.

3.3.7 Avaliação dos atributos de qualidade das sementes de moringa secas por IV.

A análise da qualidade das sementes de moringa, com e sem tegumento, foi feita a partir da determinação dos atributos de cor e viabilidade das sementes.

i) *Cor*

A cor das sementes de moringa foi medida com auxílio de um colorímetro portátil (MiniScan Ez, marca Hunterlab) com fonte de luz D₆₅, ângulo de observação de 10° e abertura da célula de medida de 30 mm, com a escala L^* , a^* , b^* do sistema CIELab, efetuando-se as medidas das coordenadas cromáticas nos grãos do material *in natura* e ao longo de cada experimento de secagem.

A calibração do colorímetro foi realizada com as placas, branca e preta, padrão, seguindo as instruções do fabricante.

De posse dos valores das coordenadas cromáticas foram determinados parâmetros de alteração de coloração. A diferença total dos parâmetros de cor (ΔE^*) do material seco foi determinada de acordo com a equação:

$$\Delta E^* = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2} \quad (2-35)$$

A partir das coordenadas retangulares do espaço de cor Lab, foram determinadas a coordenada cilíndrica ângulo *hue* (H^*), de acordo com a equação:

$$H^* = \operatorname{tg}^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (2-23)$$

ii) *Viabilidade fisiológica das sementes*

A viabilidade das sementes de moringa com e sem tegumento foi avaliada por meio do teste do tetrazólio, de acordo com procedimento descrito nas Regras para análise de Sementes (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das metodologias descritas no capítulo anterior, bem como, as respectivas discussões. São apresentadas as características de encolhimento das sementes, e em seguida, expostos e discutidos os resultados da cinética de secagem infravermelho, à luz do fenômeno de transferência de massa. A influência das condições de secagem sobre atributos de qualidade do produto é também avaliada.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS SEMENTES DE *MORINGA OLEÍFERA IN NATURA*

A Figura 4-1 mostra a distribuição do tamanho das partículas, em termos do comprimento (a), medido em mm, por paquímetro digital. Cerca de 77% das sementes apresentaram comprimento entre 8,5 e 10,5 mm. Após a remoção do tegumento, a faixa predominante do comprimento das partículas ficou entre 6,0 e 7,0 mm, conforme mostrado na Figura 4-2, representando aproximadamente 57% do total da amostra.

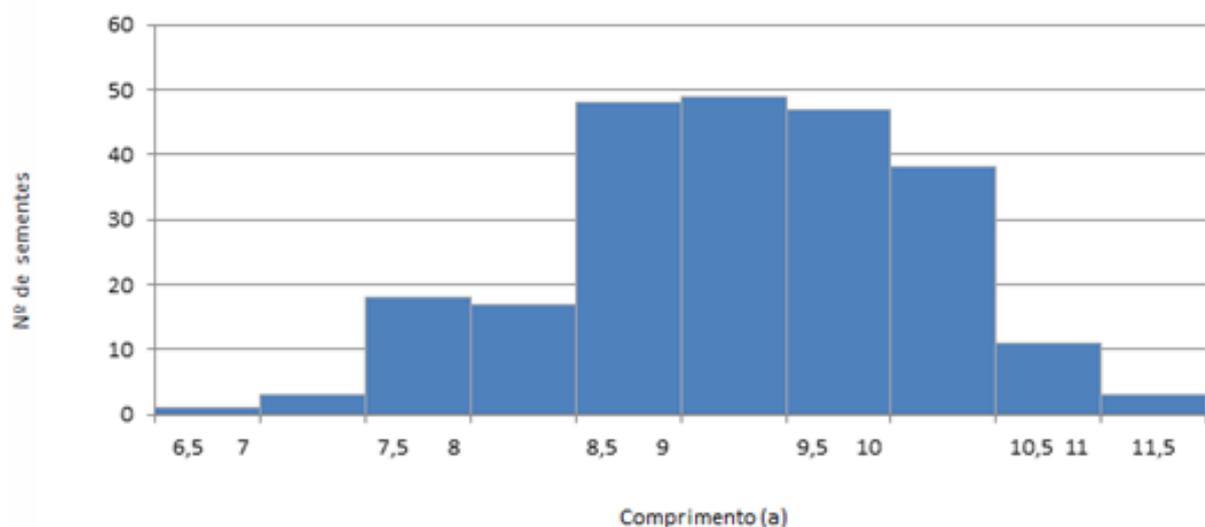


Figura 4-1: Distribuição do comprimento das sementes de moringa *in natura* com tegumento.

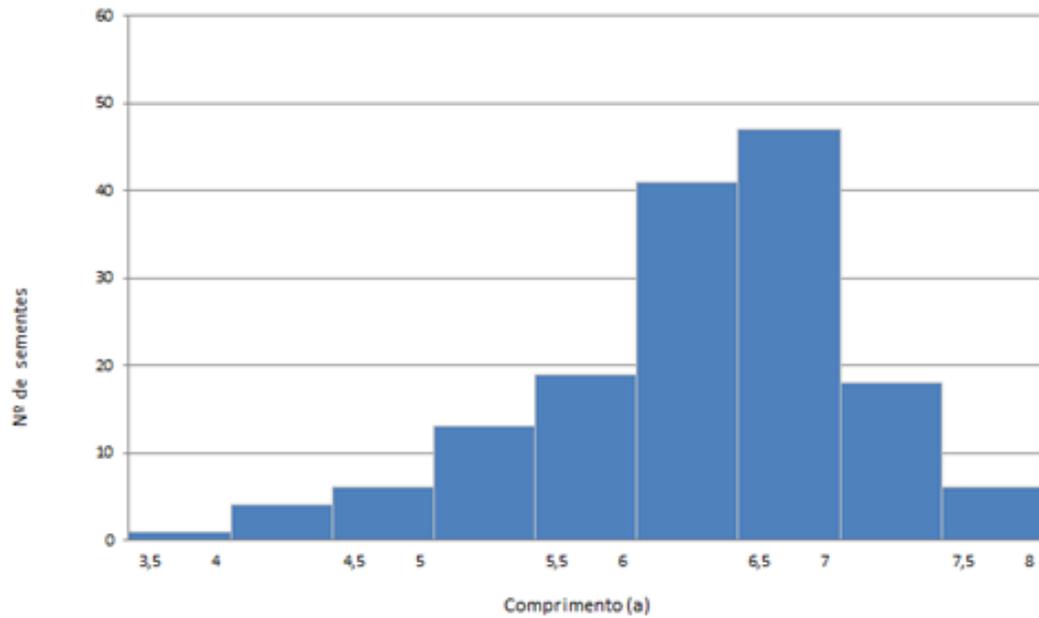


Figura 4-2: Distribuição do comprimento das sementes de moringa *in natura* sem tegumento.

Para que a influência causada pelo tamanho das sementes fosse mínima, os testes de secagem foram conduzidos com sementes de comprimentos dentro da faixa predominante observada nas amostras, ou seja, entre 8,5 e 10,0 mm para as sementes com tegumento, e entre 6,0 e 7,0 mm para as sementes sem tegumento.

Os valores médios obtidos para as medidas de comprimento, largura e espessura das sementes de moringa *in natura* com e sem tegumento, bem como os correspondentes valores calculados para diâmetro geométrico, volume, esfericidade e teor de umidade das sementes estão apresentados na Tabela 4-1.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4-1 nota-se que os valores médios de duas das três dimensões são muito próximos, o que permite considerar a geometria de ambas as sementes (com e sem tegumento) como sendo de uma esferoide oblata. Ademais, tal constatação viabiliza também o uso da técnica, não invasiva e rápida, de análise de imagens das partículas projetadas para uma precisa caracterização das alterações das dimensões, forma e outras propriedades geométricas das partículas, induzidas pelo fenômeno de encolhimento durante a secagem.

Tabela 4-1: Propriedades físicas das sementes *in natura*.

	Moringa com tegumento	Moringa sem tegumento
a (mm)	9,31 ± 0,85	6,35 ± 0,78
b (mm)	8,57 ± 1,01	5,99 ± 0,78
c (mm)	8,41 ± 0,92	5,19 ± 0,78
Dg (mm)	8,75 ± 0,84	5,80 ± 0,69
φ	0,94	0,92
m (g)	0,34 ± 0,09	0,15 ± 0,04
X (% b.u.)	63,6 ± 8,9	59,5 ± 5,6

Ao confrontar as dimensões das sementes de moringa obtidas nesse trabalho com a classificação realizada por Aviara *et al.* (2013), as sementes com tegumento podem ser classificadas como pequenas e as sem tegumento como médias. Segundo os autores que realizaram a caracterização de sementes de moringa e seu núcleo, “kernel”, colhidas na Nigéria, as sementes de moringa são classificadas como grandes quando $a > 11,5$ mm, médias se $10,0 \text{ mm} \leq a \leq 11,5$ mm e pequenas quando $a < 10,0$ mm. Por sua vez o “kernel” grande possui $a > 6,8$ mm, o médio $4,3 \text{ mm} \leq a \leq 6,8$ mm e o pequeno, $a < 4,3$ mm.

Valores elevados de esfericidade, entre 0,94 e 0,92 foram apresentados pelas sementes de moringa, o que evidencia o seu formato esférico.

A espessura inicial do tegumento das sementes é $(1,48 \pm 0,45)$ mm, ou seja, 15,9% da moringa é ocupado pelo tegumento, o que pode influenciar as taxas de transferência de calor e massa durante o processo de secagem, pois o tegumento pode oferecer resistência a penetração da radiação, e ainda dificultar a migração da umidade do interior da semente para a superfície.

Verifica-se também o alto teor de umidade inicial das sementes de moringa, acima de 55% em base úmida, valores estes extremamente elevados quando comparados com os valores de 20 a 30% em base úmida, apresentados pelas sementes de outras oleaginosas, como girassol e soja. O tegumento das sementes também apresenta um conteúdo de água em sua constituição, desse modo essas sementes possuem um teor de umidade cerca de 6,9% maior que as sementes sem tegumento, tornando-as ainda mais suscetíveis ao aparecimento de microrganismos que causam a sua deterioração.

Essas características físicas, assim como o teor de proteínas, lipídeos e carboidratos, constituintes da semente e do tegumento, podem influenciar na uniformidade da secagem, à medida que esses fatores interferem na absorção da radiação e na homogeneidade do aquecimento (NINDO & MWITHIGA, 2011).

4.2 CARACTERÍSTICAS DE ENCOLHIMENTO DAS PARTÍCULAS

4.2.1 *Alterações das dimensões e forma das partículas durante a secagem.*

Os resultados típicos obtidos via análise de imagens para os parâmetros de dimensão (A_{proj} , L_{max} , L_{min} , d_{max} , d_{min} , dF_{max} e dF_{min}) e de forma (C , ζ e φ) em função do teor de umidade durante a secagem IV com temperatura da fonte de aquecimento de 90°C são apresentados na Tabela 4-2, para as sementes com e sem tegumento.

Os resultados advindos da análise de imagens das partículas projetadas apresentaram dois comportamentos distintos. Os sete parâmetros diretamente relacionados às dimensões da partícula projetada diminuíram de forma proporcional em magnitude, durante a remoção de umidade, sugerindo que as sementes não sofreram alteração significativa em sua forma, o que é corroborado pelos valores de alongamento (ζ), circularidade (C) e compactação (φ) próximos de 1, e sem nenhuma alteração significativa durante o processo. Comportamentos similares foram observados em todas as temperaturas investigadas.

A remoção do tegumento das sementes levou a uma redução de 19,0 a 20,7% no tamanho das partículas, antes do processo de secagem, em comparação com as sementes com tegumento. Após a secagem, ao atingirem teores de umidade entre 11 e 13% b.u., essa redução chegou 36,0%, indicando diferenças no comportamento de encolhimento das sementes com e sem tegumento.

De acordo com a Tabela 4-2, apesar de retiradas as valvas, as sementes com tegumento ainda apresentavam algumas arestas, a presença destas influenciou nos valores relacionados aos parâmetros de forma, tornando a circularidade (C) e a compactação geométrica (φ) dessas sementes pouco maiores que as das sementes sem tegumento. Estas, por sua vez, tiveram

valores de circularidade mais próximos de 1, indicando que a remoção do tegumento das sementes de moringa contribui para a obtenção de partículas com formato mais arredondado.

Tabela 4-2: Resultados típicos da análise de imagens para as sementes de moringa com e sem tegumento, em diferentes teores de umidade, durante o processo de secagem a $T_{IR} = 90^{\circ}\text{C}$.

Moringa com tegumento										
X(bu)	A_{proj} (mm²)	L_{max} (mm)	L_{min} (mm)	d_{max} (mm)	d_{min} (mm)	dF_{max} (mm)	dF_{min} (mm)	ζ	φ	C
0,63	67,17	9,74	8,82	9,91	8,34	8,84	10,08	1,11	0,97	1,07
0,55	65,62	9,58	8,73	9,75	8,27	8,73	9,93	1,10	0,97	1,06
0,42	64,70	9,46	8,72	9,63	8,26	8,70	9,81	1,09	0,98	1,06
0,31	64,28	9,48	8,64	9,62	8,17	8,65	9,79	1,10	0,97	1,06
0,20	63,68	9,42	8,62	9,57	8,18	8,60	9,71	1,10	0,97	1,05
0,11	62,48	9,36	8,52	9,47	8,08	8,51	9,60	1,10	0,97	1,05
Moringa sem tegumento										
X(bu)	A_{proj} (mm²)	L_{max} (mm)	L_{min} (mm)	d_{max} (mm)	d_{min} (mm)	dF_{max} (mm)	dF_{min} (mm)	ζ	φ	C
0,67	45,42	7,97	7,24	7,92	6,97	7,11	7,99	1,10	0,95	1,00
0,54	37,50	7,27	6,54	7,22	6,27	6,42	7,30	1,12	0,95	1,00
0,47	31,70	6,76	5,95	6,69	5,69	5,82	6,76	1,14	0,94	1,00
0,35	29,62	6,53	5,73	6,49	5,45	5,61	6,55	1,15	0,94	1,01
0,24	25,87	6,12	5,32	6,05	5,01	5,21	6,12	1,16	0,93	1,01
0,13	25,92	6,13	5,32	6,06	5,03	5,22	6,13	1,16	0,93	1,01

Tanto para as sementes com tegumento como para as sementes sem tegumento, as reduções observadas em todos os parâmetros relacionados às dimensões das partículas projetadas foram proporcionais em magnitude, sugerindo que o material não sofreu variação significativa em sua forma durante a secagem, o que é corroborado pelos valores dos três parâmetros de forma avaliados.

A Figura 4-3 mostra os valores calculados para o diâmetro equivalente das sementes com e sem tegumento em função do teor de umidade, para as diferentes condições de secagem IV empregadas.

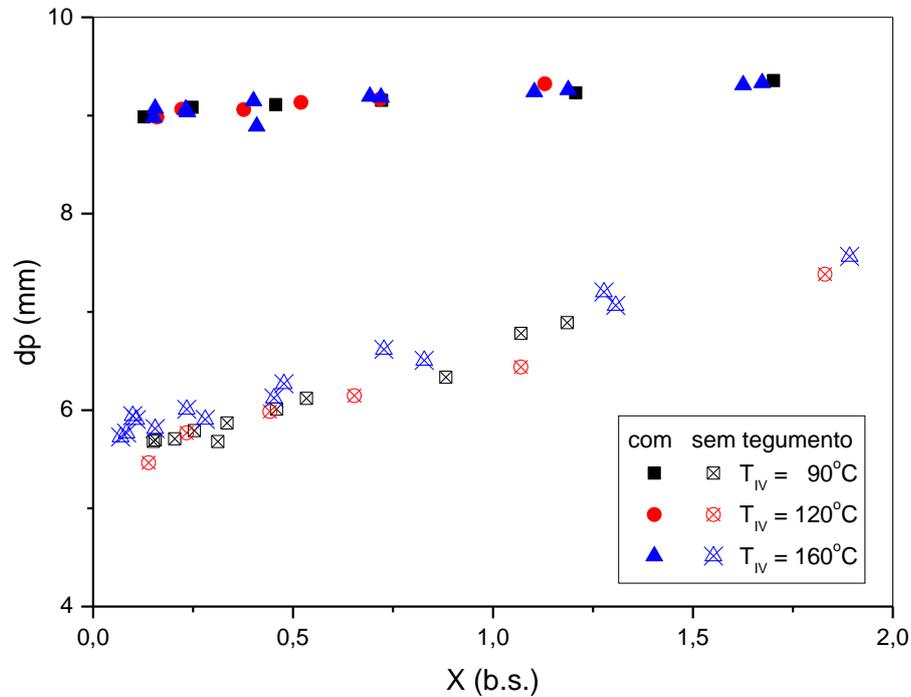


Figura 4-3: Diâmetro equivalente das sementes com e sem tegumento em função do teor de umidade.

Verifica-se uma redução em torno de 4 e 26% no diâmetro equivalente das sementes com e sem tegumento, respectivamente. Estes resultados indicam a ocorrência do fenômeno do encolhimento durante o processo de secagem de sementes de moringa.

Reduções no tamanho de sementes de outras oleaginosas também foram reportados nos trabalhos de Goneli *et al.* (2011) para frutos da mamona, Araújo *et al.* (2014) para amendoim e Irigoyen *et al.* (2014) para soja.

A variação do diâmetro equivalente mostrou-se independente das condições operacionais, sendo correlacionado somente com o teor de umidade das partículas desidratadas. Os diâmetros equivalentes das partículas com e sem tegumento apresentaram uma dependência linear com relação ao teor de umidade, representadas, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$dp = 8,991 + 0,220X \quad (4-1)$$

$$dp = 5,606 + 1,020X \quad (4-2)$$

Os desvios relativos médios obtidos ao se correlacionar os dados de diâmetro equivalente das sementes com e sem tegumento com o teor de umidade pelas Equações (30) e (31) foram de 0,8% e 2%, respectivamente.

Na Figura 4-4 são apresentados os resultados relativos à esfericidade das sementes com e sem tegumento em função do teor de umidade, obtidos durante experimentos de secagem IV conduzidos com temperaturas da fonte de aquecimento de 90, 120 e 160°C.

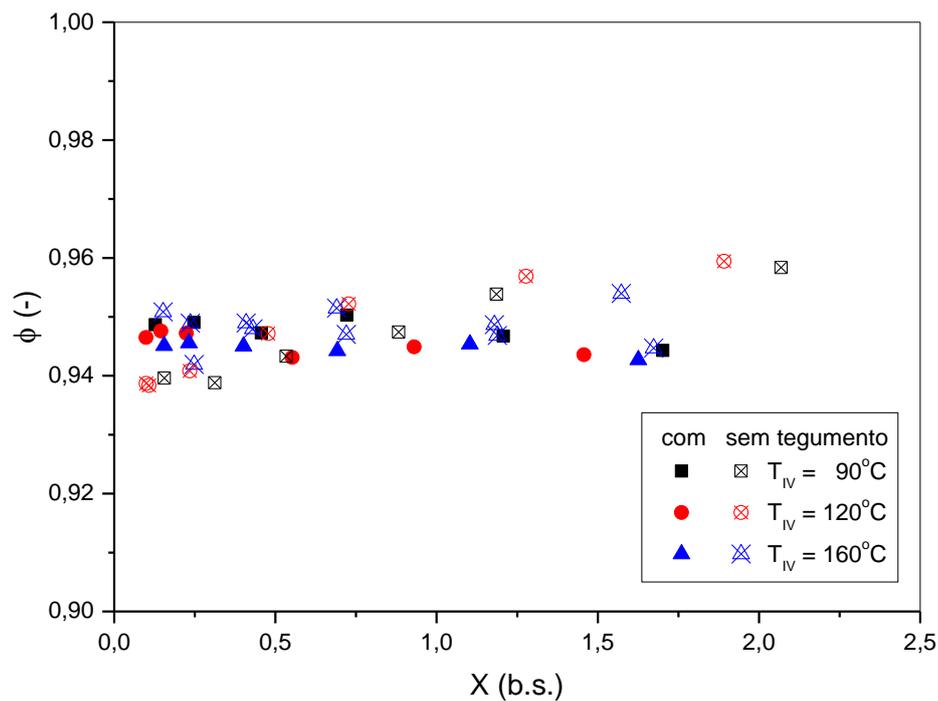


Figura 4-4: Esfericidade das sementes com e sem tegumento, em função do teor de umidade.

A esfericidade das sementes com tegumento não mostrou nenhuma clara tendência com o teor de umidade, tampouco foi afetada pela temperatura de aquecimento IV. Ao se remover o tegumento, a esfericidade parece apresentar uma suave tendência de diminuir com a redução de umidade. No entanto, uma análise de variância mostrou não haver nenhuma diferença significativa entre os valores de esfericidade durante o processo de secagem.

Logo, sob a faixa operacional investigada, não foi possível identificar qualquer tendência consistente da esfericidade variar com o teor de umidade, ou qualquer efeito da temperatura sobre este parâmetro de forma.

A esfericidade variou entre 0,944 e 0,938 para sementes com tegumento e 0,959 e 0,939 para sementes sem tegumento, sugerindo que o encolhimento das partículas não é acompanhado por alterações significativas de sua forma. Ademais os valores obtidos para os dois tipos de sementes permitem a modelagem do processo de secagem de ambas em coordenadas esféricas.

4.2.2 *Encolhimento superficial e volumétrico das partículas.*

Os resultados típicos das razões de encolhimento volumétrico (V_p/V_{p0}) e superficial (A_p/A_{p0}) das sementes de moringa com e sem tegumento em função do adimensional de umidade (XR), durante a secagem com diferentes temperaturas da fonte de aquecimento IV, são apresentados nas Figuras 4-5 e 4-6, respectivamente.

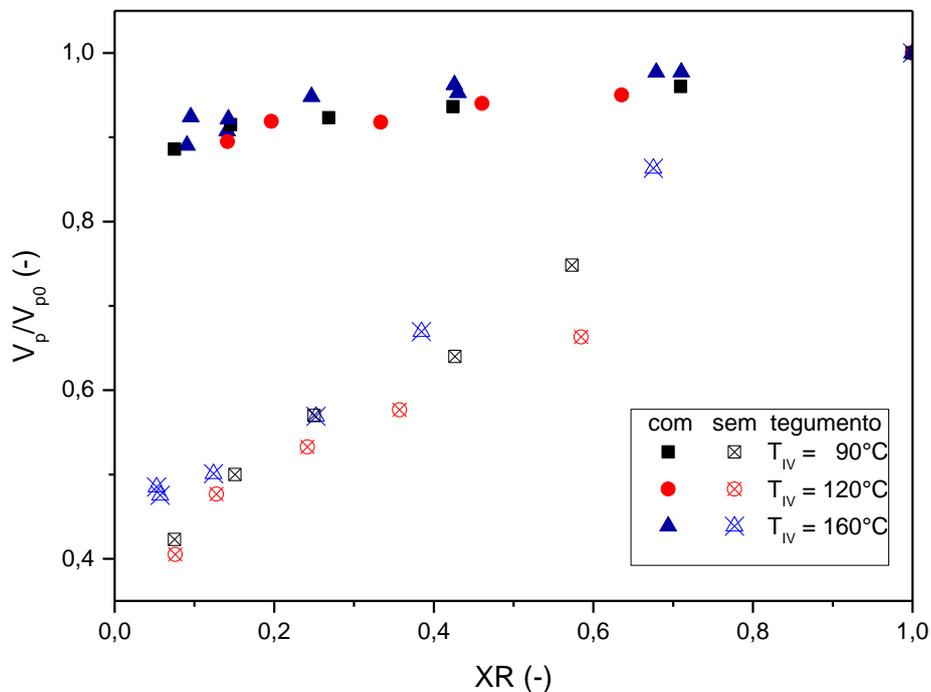


Figura 4-5: Razão do encolhimento volumétrico das sementes de moringa com e sem tegumento em função do teor de umidade, para diferentes temperaturas de aquecimento IV.

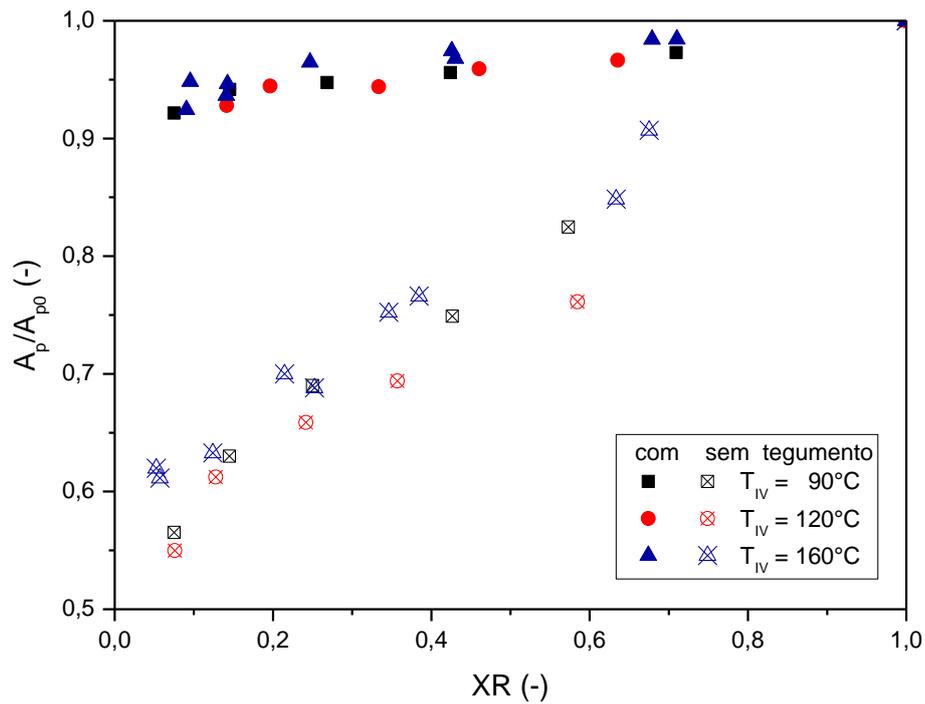


Figura 4-6: Razão do encolhimento superficial das sementes de moringa com e sem tegumento em função do teor de umidade, para diferentes temperaturas de aquecimento IV.

Os desvios entre os dados experimentais obtidos em diferentes temperaturas da fonte IV foram menores que os erros de medida, indicando que, na faixa investigada, a temperatura teve um efeito negligenciável sobre o encolhimento das sementes com e sem tegumento. Assim, tanto a contração de volume como a redução de área, para ambas as sementes, podem ser correlacionadas como função apenas do adimensional de umidade. Resultados similares são reportados na literatura para outros materiais, tais como: castanha portuguesa (MOREIRA *et al.*, 2005) e cereja (OCHOA *et al.*, 2007).

As razões V_p/V_{p0} foram correlacionadas com o adimensional de umidade por relações empíricas lineares expressas como:

$$\frac{V_p}{V_{p0}} = 0,897 + 0,105XR \quad (4-3)$$

para sementes com tegumento, e:

$$\frac{V_p}{V_{p0}} = 0,413 + 0,583XR \quad (4-4)$$

para sementes sem tegumento, as quais foram caracterizadas por desvios relativos médios de 1,01 e 4,23%, respectivamente.

O encolhimento superficial das sementes com e sem tegumento durante a secagem não foram influenciadas significativamente pela temperatura de aquecimento IV, podendo ser representados como função apenas do adimensional de umidade pelas equações:

$$\frac{A_p}{A_{p0}} = 0,929 + 0,072XR \quad (4-5)$$

$$\frac{A_p}{A_{p0}} = 0,569 + 0,434XR \quad (4-6)$$

com desvios relativos médios de 0,67 e 2,91%, respectivamente.

A contração de volume e a redução na área superficial das sementes com tegumento ao final do processo atingiram valores de, aproximadamente, 10% e 7%, respectivamente. Ao se remover o tegumento, verifica-se um encolhimento, tanto em termos volumétricos como em termos da área exposta à transferência de calor e massa, significativamente maior, em comparação com as sementes com tegumento, com valor cerca de seis vezes superior.

A maior rigidez do tegumento e a resistência extra oferecida à transferência de massa faz com que a migração de umidade interna não supra a taxa de evaporação na superfície da partícula, causando à secagem superficial do tegumento, diminuindo assim sua mobilidade e levando ao estado vítreo. Isto induz ao fenômeno conhecido como “case hardening” que limita o encolhimento do material.

De acordo com Rocha (2012), a presença da casca evita ou diminui o impacto ou mesmo os possíveis danos causados pelas tensões desenvolvidas durante o processo de secagem. Sua função ao envolver a semente é protegê-la contra choques e abrasões, além de servir como barreira à penetração de microrganismos e regular a velocidade de reidratação durante o processo de germinação.

As Figuras 4-7 e 4-8 apresentam a variação do volume das partículas em função da variação do volume de água evaporada nas diferentes condições de secagem IV das sementes de moringa com e sem tegumento, respectivamente.

O volume de água evaporada foi calculado a partir da redução de massa da amostra, considerando a massa específica da água igual a 1000 kg/m^3 . Pode ser verificado que para sementes com tegumento a contração de volume da partícula foi menor que o correspondente volume de água evaporada durante o processo de secagem. Este comportamento pode ser explicado pelo endurecimento do tegumento (*case hardening*) que recobre as sementes, que restringe a variação de volume das partículas, tornando-a menor que a quantidade de água removida.

De acordo com May e Perré (2002), este comportamento é acompanhado por um aumento simultâneo do volume de vazios dentro da partícula, ou seja, por um aumento de sua porosidade.

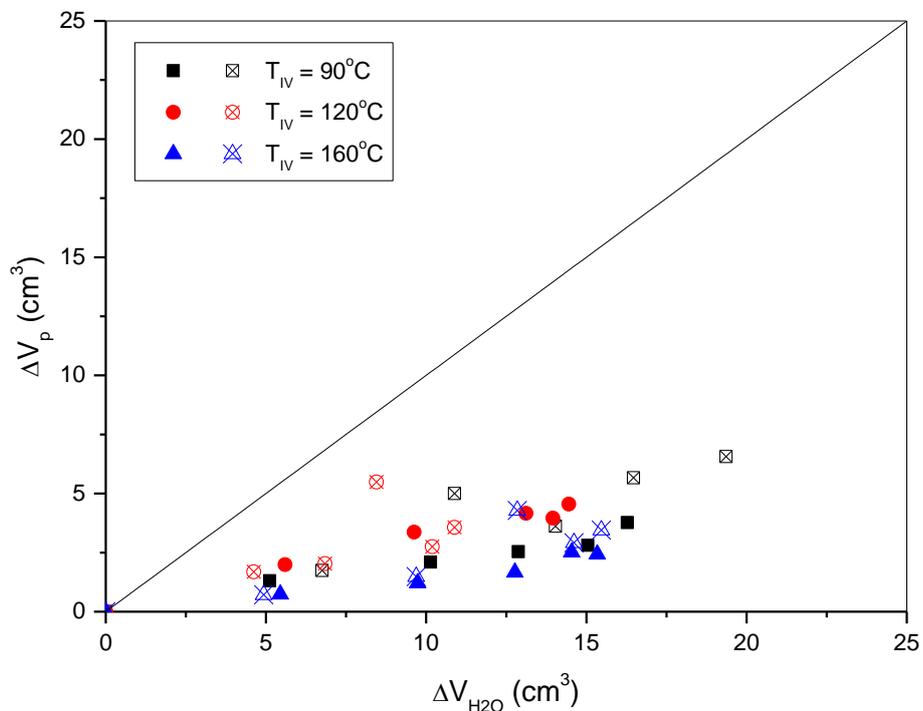


Figura 4-7: Variação de volume das sementes de moringa com tegumento em função da variação do volume de água removida, em diferentes temperaturas de aquecimento IV.

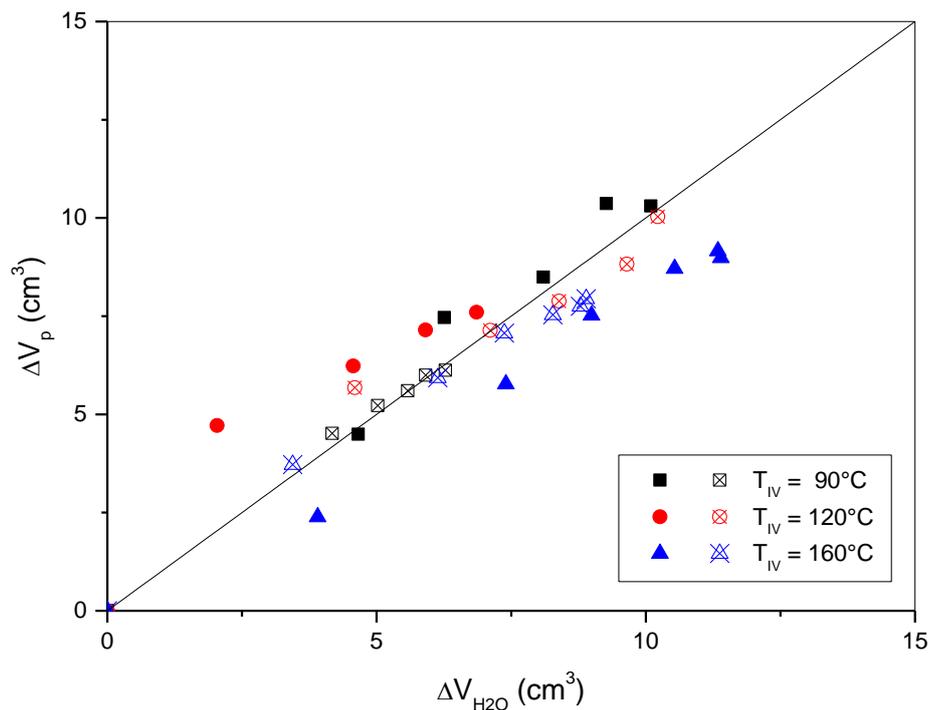


Figura 4-8: Variação de volume das sementes de moringa sem tegumento em função da variação do volume de água removida, em diferentes temperaturas de aquecimento IV.

Para as sementes de moringa sem tegumento, Figura 4-8, verifica-se em toda a faixa operacional investigada, que os dados se encontram randomicamente distribuídos em torno da bissetriz. Isto indica que o encolhimento foi, aproximadamente, ideal, tal que a remoção de umidade provocou uma contração de volume nas partículas quase equivalente ao correspondente volume de água evaporada.

Os efeitos induzidos pelo encolhimento sobre as propriedades estruturais das sementes de moringa foram analisados em termos da densidade aparente das partículas. Resultados típicos de densidade aparente em função do adimensional de umidade são apresentados na Figura 4-9 para as sementes com e sem tegumento.

Os diferentes comportamentos de densidade da partícula apresentados pelas sementes com e sem tegumento durante a secagem IV podem ser atribuídas às características distintas de redução de massa e volume sob a remoção de umidade, as quais foram discutidas anteriormente.

A densidade aparente das sementes com tegumento diminuiu com a remoção de umidade em todas as condições de secagem investigadas. Isto está relacionado à menor contração de volume das partículas em comparação com a redução de massa provocada pela

perda de umidade. Este resultado também é um indicativo da formação de vazios dentro da estrutura delimitada pelo tegumento.

Com a remoção do tegumento, a densidade aparente das partículas permaneceu praticamente constante durante a secagem IV, à medida que a contração de volume das partículas e a remoção de água evaporada ocorreram em proporções similares.

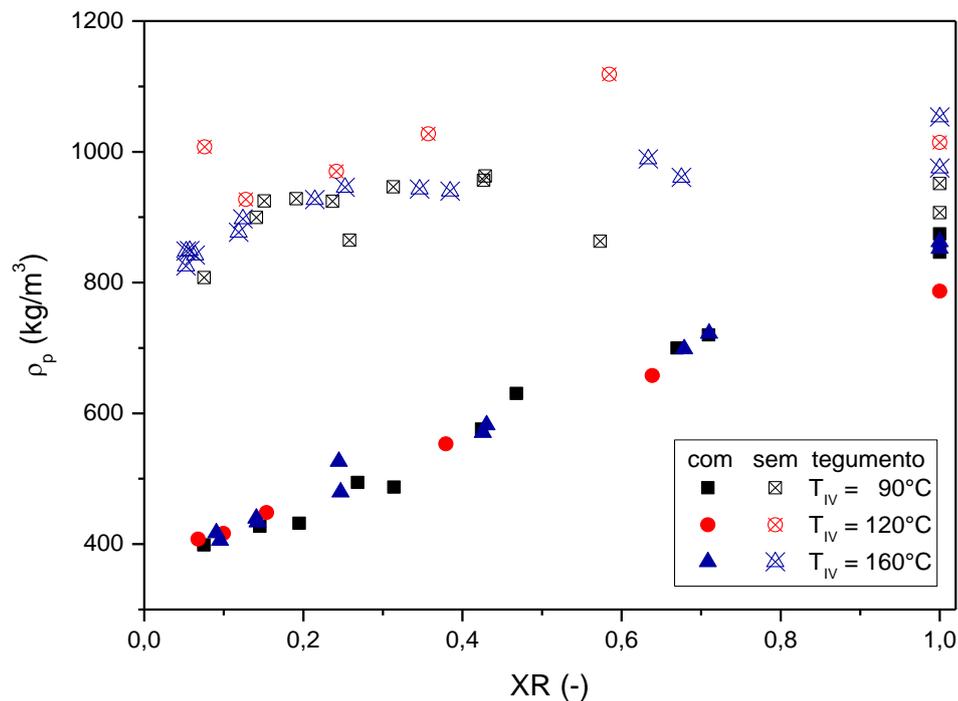


Figura 4-9: Densidade aparente das sementes de moringa com e sem tegumento em função do adimensional de umidade, em diferentes temperaturas da fonte de aquecimento IV.

Como resultado das características de encolhimento apresentadas na Figura 4-9, as sementes sem tegumento tendem a ser, após a secagem, significativamente mais densas que aquelas com tegumento.

A redução significativa no volume e na área superficial das sementes de moringa aponta a necessidade de levar em conta as alterações na área superficial das partículas para o cálculo da densidade do fluxo de umidade, bem como para incluir o encolhimento nos modelos de transferência de massa. Assuntos estes que serão analisados a seguir.

4.3 CINÉTICA DE SECAGEM

A seguir é apresentada a análise da cinética de secagem IV em camada fina das sementes de moringa com e sem tegumento. A influência da temperatura da fonte de aquecimento, bem como a influência do tegumento da moringa sobre o comportamento de secagem foram avaliados e discutidos. Inicialmente, entretanto, serão avaliados os efeitos da consideração ou não do fenômeno de encolhimento das partículas sobre o comportamento de secagem do material.

4.3.1 *Influência das alterações na área de transferência induzidas pelo encolhimento*

As Figuras 4-10 e 4-11 apresentam os resultados de densidade de fluxo de umidade das sementes de moringa com e sem tegumento, respectivamente, calculados com e sem a consideração da variação da área de transferência de massa, durante o processo de secagem IV com temperatura da fonte de 90°C.

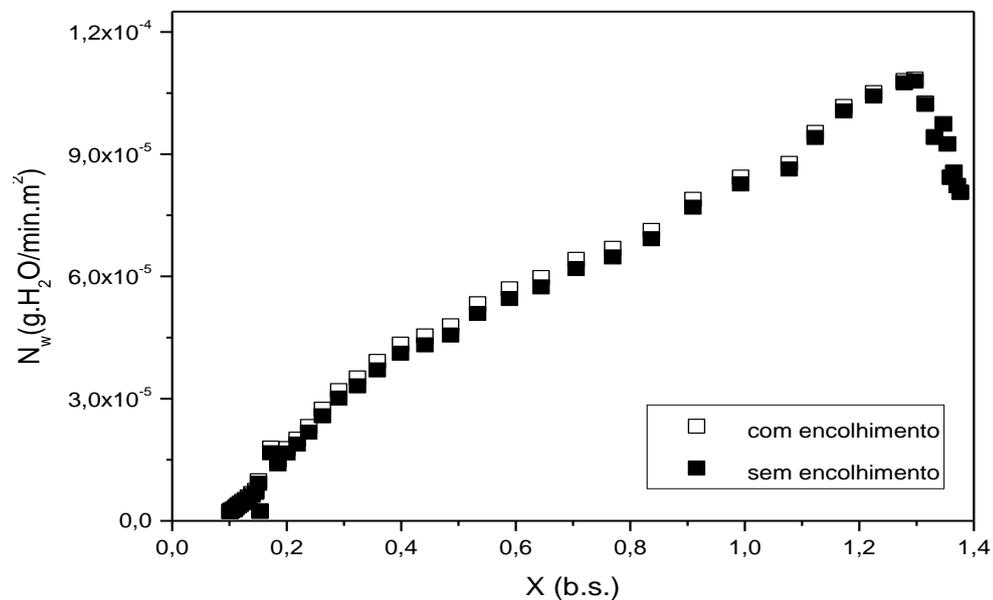


Figura 4-10: Densidade de fluxo de umidade em função do teor de umidade, para sementes de moringa com tegumento.

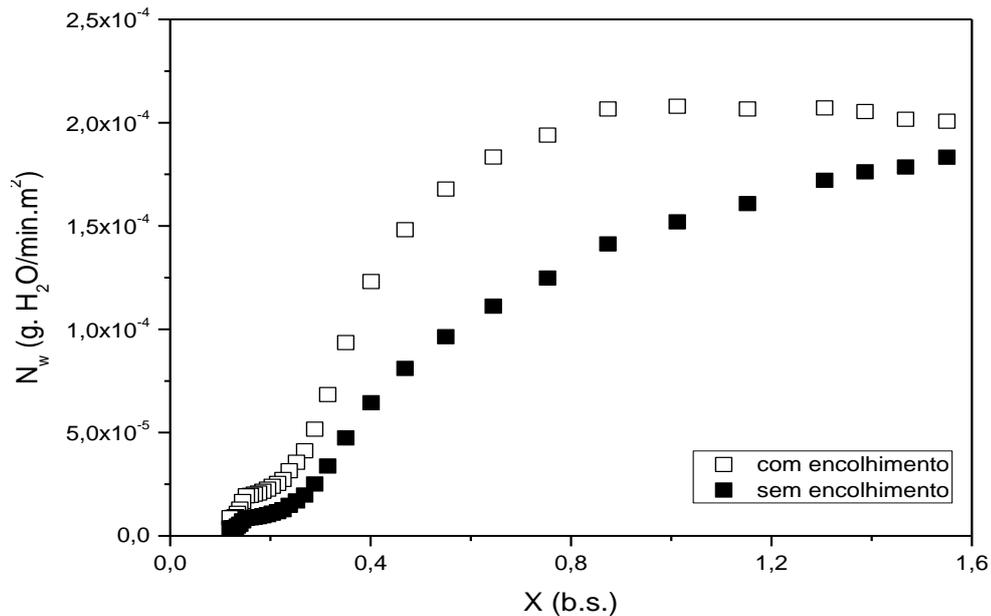


Figura 4-11: Densidade de fluxo de umidade em função do teor de umidade, para sementes de moringa sem tegumento.

As sementes com tegumento não sofreram uma grande redução da área no decorrer do processo, no máximo de 7%. Desse modo, considerar ou não o encolhimento não acarreta em diferenças significativas nas curvas obtidas para a densidade de fluxo, como pode ser constatado Figura 4-10.

Por sua vez, a remoção do tegumento provocou um encolhimento significativo das sementes durante a secagem, com uma redução da área de transferência de calor e massa acima de 40%. Não considerar essa variação de área leva, por exemplo, à supressão ou abreviação do período de fluxo constante, que ocorre até um teor de umidade em torno de 0,8 (b.s.), conforme mostrado na Figura 4-11, acarretando uma interpretação errônea de que a transferência de massa na secagem das sementes sem tegumento é puramente difusiva. Além disso, os fluxos de umidade são subestimados ao longo de todo o processo.

Logo, a análise do comportamento cinético de secagem das sementes de moringa será feita em termos das curvas de densidade de fluxo de umidade em função do tempo ou do adimensional de umidade, em conjunção com a evolução de temperatura e adimensional de umidade ao longo do processo.

4.3.2 Influência da temperatura da fonte de aquecimento

Os resultados típicos de umidade adimensional (XR) das sementes de moringa com tegumento em função do tempo de secagem parametrizados na temperatura da fonte de aquecimento IV são apresentados na Figura 4-12.

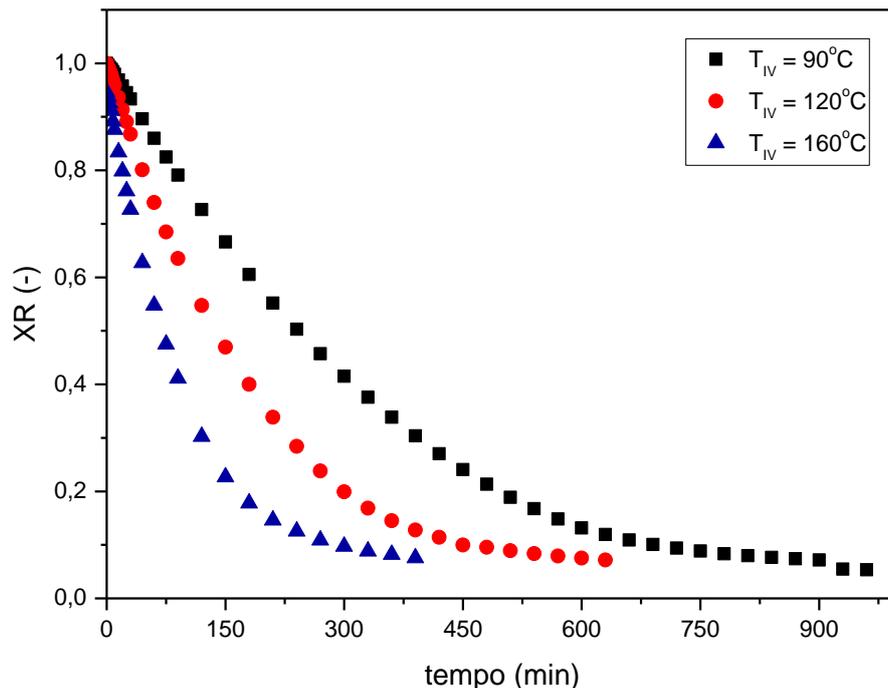


Figura 4-12: Teor de umidade adimensional das sementes de moringa com tegumento em função do tempo, para as diferentes temperaturas da fonte de aquecimento.

É observada a redução exponencial da umidade ao longo do tempo, característica típica do comportamento de secagem de materiais biológicos (Celma, *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2012). Conforme esperado, a temperatura da fonte IV exerce uma influência significativa sobre a cinética de secagem das sementes, tal que o aumento desse parâmetro resultou numa remoção de umidade mais rápida, e consequente redução do tempo do processo. Resultados similares foram observados na secagem IV de diferentes oleaginosas: girassol (Santos, 2009), pinhão – manso (Silva Neto *et al.*, 2014), soja (Niamuny *et al.*, 2012).

Foram necessários, aproximadamente, 900, 500 e 300 minutos, para que as sementes de moringa submetidas à secagem com temperatura da fonte de aquecimento IV de 90, 120 e 160°C, respectivamente, atingissem uma umidade final de 10% (b.u).

Na Figura 4-13 é apresentada a evolução da temperatura da superfície das sementes com tegumento em função do tempo de secagem, nas diferentes condições de temperatura da fonte IV empregadas. No início do processo há um período de aquecimento caracterizado por um rápido aumento de temperatura, após o qual a temperatura da superfície das partículas aumenta de forma mais gradativa, tendendo assintoticamente a valores de equilíbrio.

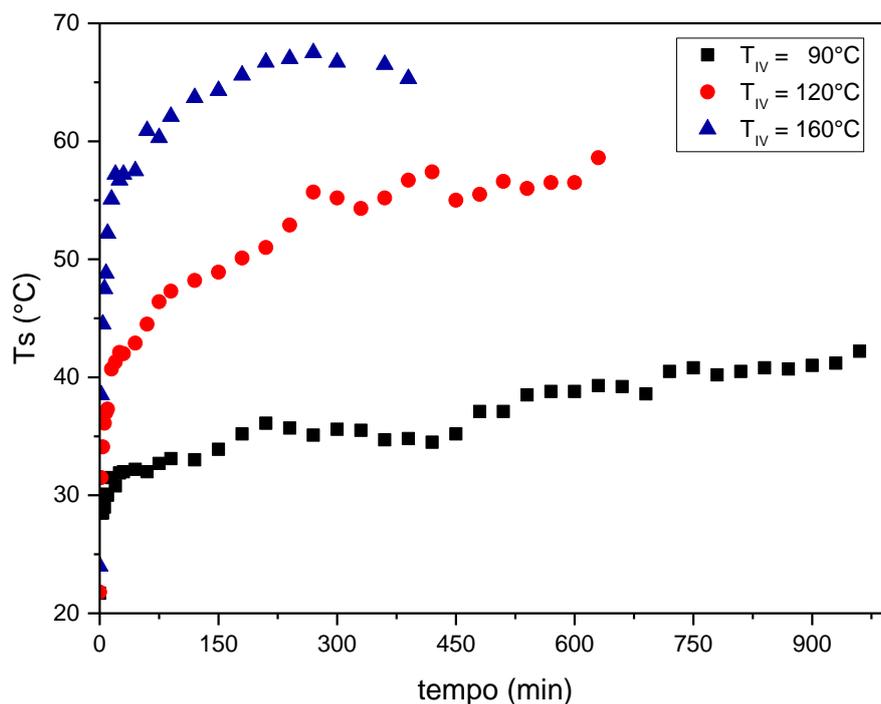


Figura 4-13: Temperatura da superfície das sementes de moringa com tegumento em função do tempo, para as diferentes temperaturas da fonte de aquecimento.

Nota-se que quanto maior a temperatura da fonte de aquecimento IV, maior é a emissão e a absorção de energia radiante por parte da semente fazendo com que a temperatura de sua superfície seja maior, o que está de acordo com o relatado por Ponkham *et al.* (2012) para a secagem de abacaxi e Irigoyen *et al.* (2014) para a secagem de soja. Cabe ressaltar que um estudo térmico preliminar foi realizado para selecionar as temperaturas da fonte de aquecimento, de modo que a temperatura atingida pela superfície do material fosse mantida em um limite seguro e não afetasse significativamente a qualidade fisiológica das sementes de moringa. Com o emprego das temperaturas de 90, 120 e 160°C, não houve um aquecimento excessivo das sementes, as quais atingiram temperaturas entre 40, 55 e 65°C.

Na Figura 4-14 é apresentada a densidade de fluxo das sementes de moringa com tegumento em função do tempo, nas temperaturas estudadas. No início do processo, pode ser observado um rápido aumento do fluxo de secagem que está associado ao período de aquecimento das partículas. Este período durou aproximadamente 6, 8 e 20 minutos para as temperaturas de 160, 120 e 90°C, respectivamente.

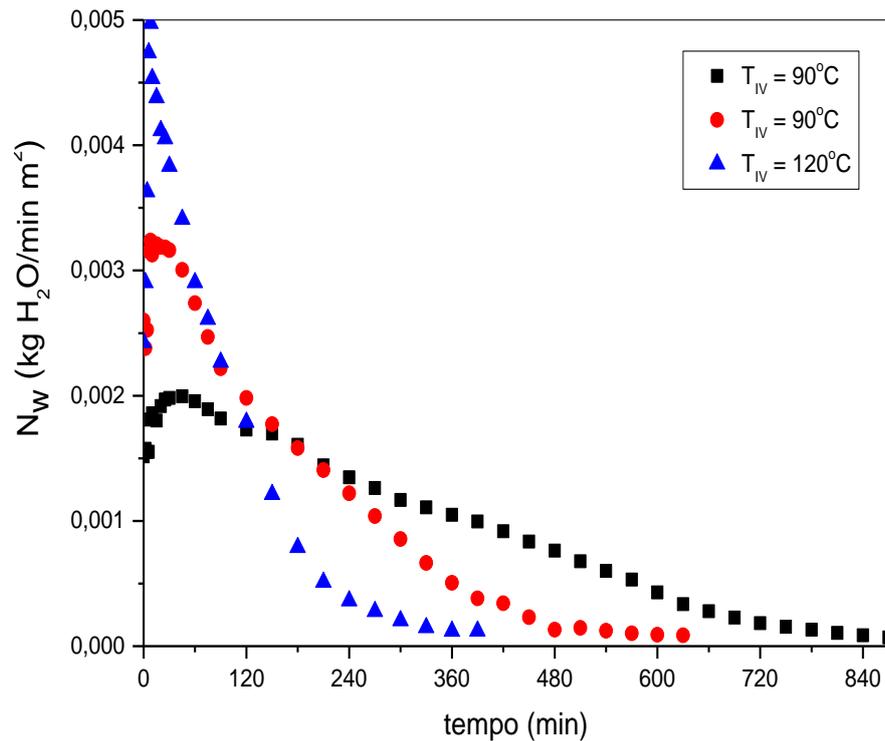


Figura 4-14: Densidade de fluxo de umidade das sementes de moringa com tegumento em função do tempo, para as diferentes temperaturas da fonte de aquecimento.

O aumento da intensidade de radiação eletromagnética, provocado pelo aumento da temperatura da fonte de aquecimento IV, resultou em um aumento na pressão de vapor d'água dentro das partículas e, conseqüentemente, em maiores fluxos de umidade durante a secagem (FASINA *et al.*, 2001). Resultados similares foram relatados por Hasan & Roshon (2014) para a secagem em camada fina de sementes de arroz e por Flores *et al.* (2012) no estudo da secagem de mamona.

4.3.3 Influência da remoção do tegumento

Cerca de 15,9% do tamanho inicial das sementes de moringa é ocupado por seu tegumento. Esse fator pode influenciar os fenômenos de transferência que ocorrem durante o processo de secagem. Na Figura 4-15 são apresentadas as curvas de secagem que mostram os resultados obtidos para as sementes com e sem tegumento durante o processo de secagem IV na faixa operacional investigada.

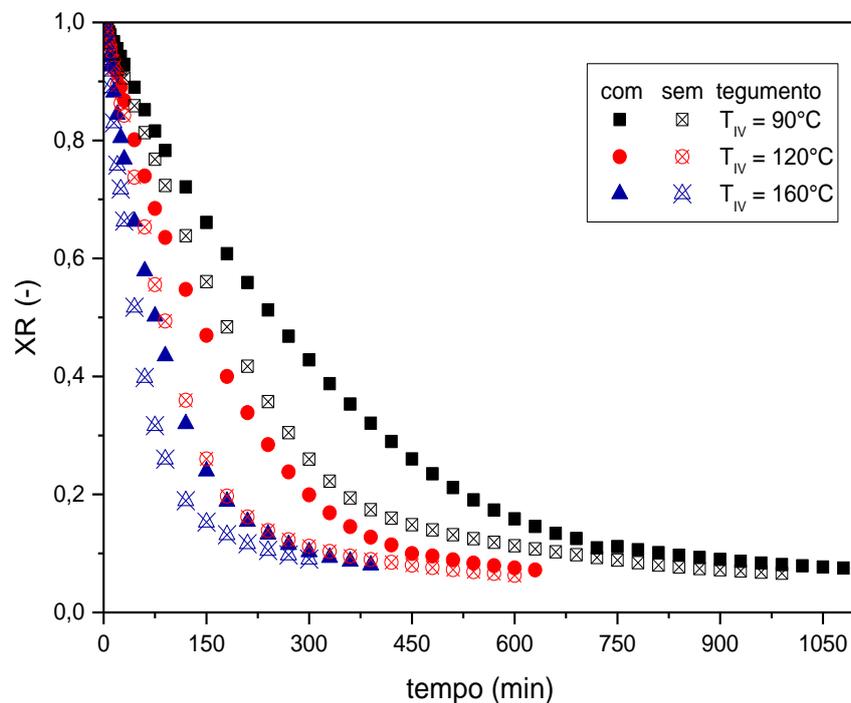


Figura 4-15: Teor de umidade adimensional das sementes de moringa com e sem tegumento em função do tempo, para diferentes temperaturas da fonte de aquecimento.

A remoção do tegumento eliminou uma resistência à transferência de calor e massa, facilitando a passagem e absorção de energia radiante pelo núcleo (“kernel”) da semente de moringa, bem como o transporte de umidade do interior para a superfície, acelerando o processo de secagem em todas as condições de aquecimento IV.

Na Figura 4-15 pode ser notada a maior proximidade entre as curvas de secagem das sementes com e sem tegumento para a temperatura da fonte IV de 160°C. A maior taxa de aquecimento das sementes com tegumento nesta condição e as maiores temperaturas atingidas

contribuem para manter elevadas pressões de vapor d'água dentro das partículas, contribuindo para a força motriz do fenômeno de transferência superar a resistência imposta pelo tegumento.

A Figura 4-16 mostra a evolução de temperatura da superfície das sementes com e sem tegumento submetidas ao processo de secagem em diferentes condições de temperatura da fonte IV, mas com temperatura e teor de umidade iniciais das sementes próximos, em torno de 22°C e 60% b.u. Observa-se não haver diferença significativa entre as respostas ao aquecimento IV. Com a umidade e temperatura iniciais próximos, a absorção de energia radiante pela superfície das partículas foi, como esperado, similar, levando a taxas de aquecimento e temperaturas finais atingidas pelas sementes também similares.

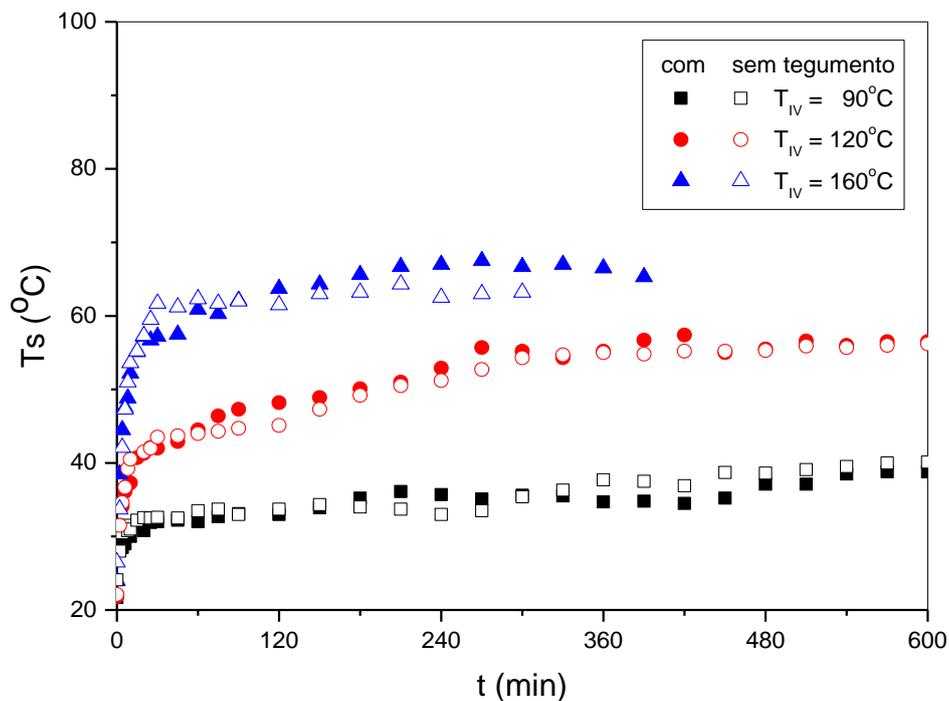


Figura 4-16: Temperatura da superfície das sementes de moringa com e sem tegumento em função do tempo, para diferentes temperaturas da fonte de aquecimento.

A Figura 4-17 mostra os resultados de densidade de fluxo de umidade das sementes de moringa sem tegumento em função do tempo, em diferentes temperaturas da fonte IV.

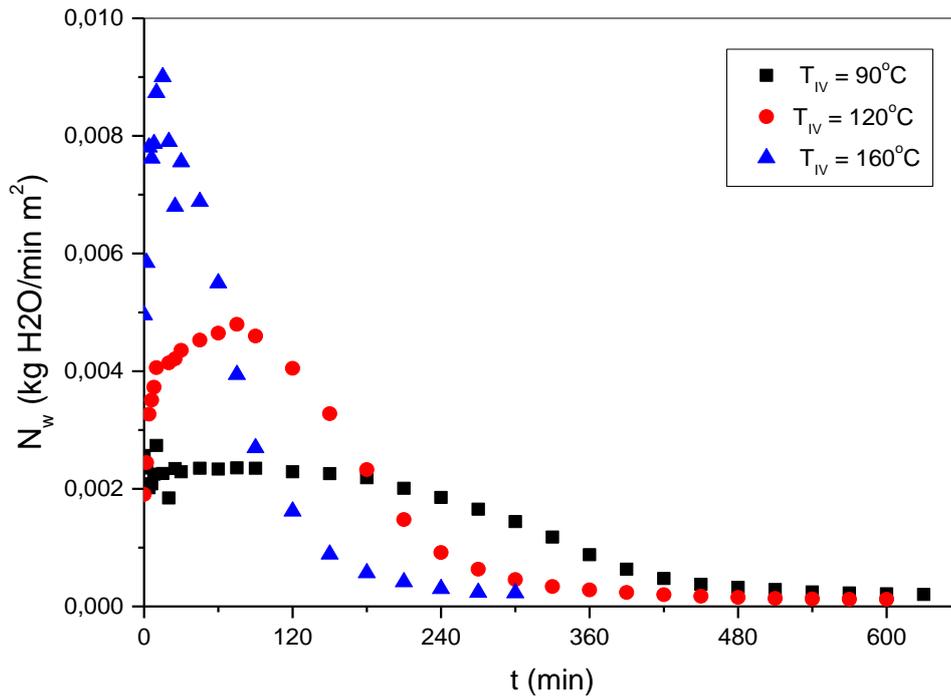


Figura 4-17: Densidade de fluxo de umidade das sementes de moringa sem tegumento em função do tempo, para diferentes temperaturas da fonte IV empregadas.

Como pode ser visto na Figura 4-17, para temperaturas da fonte de 90 e 120°C a cinética do processo de secagem IV das sementes de moringa sem tegumento se caracterizou também pela presença dos períodos de aquecimento, fluxo constante e fluxo decrescente. A eliminação da resistência imposta pelo tegumento contribuiu para a migração interna de umidade compensar a taxa de evaporação na superfície da partícula durante um maior tempo, resultando num período de fluxo constante cerca de três vezes mais prolongado em relação àquele apresentado pelas sementes com tegumento. Ao se aplicar a condição mais intensa de aquecimento IV ($T_{IV} = 160^\circ$) que leva a uma rápida secagem da superfície das partículas, o processo ocorreu no período de aquecimento seguido imediatamente do período de fluxo decrescente.

Em todas as condições experimentais, tal qual ocorrido para sementes com tegumento, o período de secagem a fluxo decrescente foi predominante.

A Figura 4-18 apresenta a densidade de fluxo de umidade das sementes de moringa com e sem tegumento em função do adimensional de umidade durante o processo de secagem a 90°C.

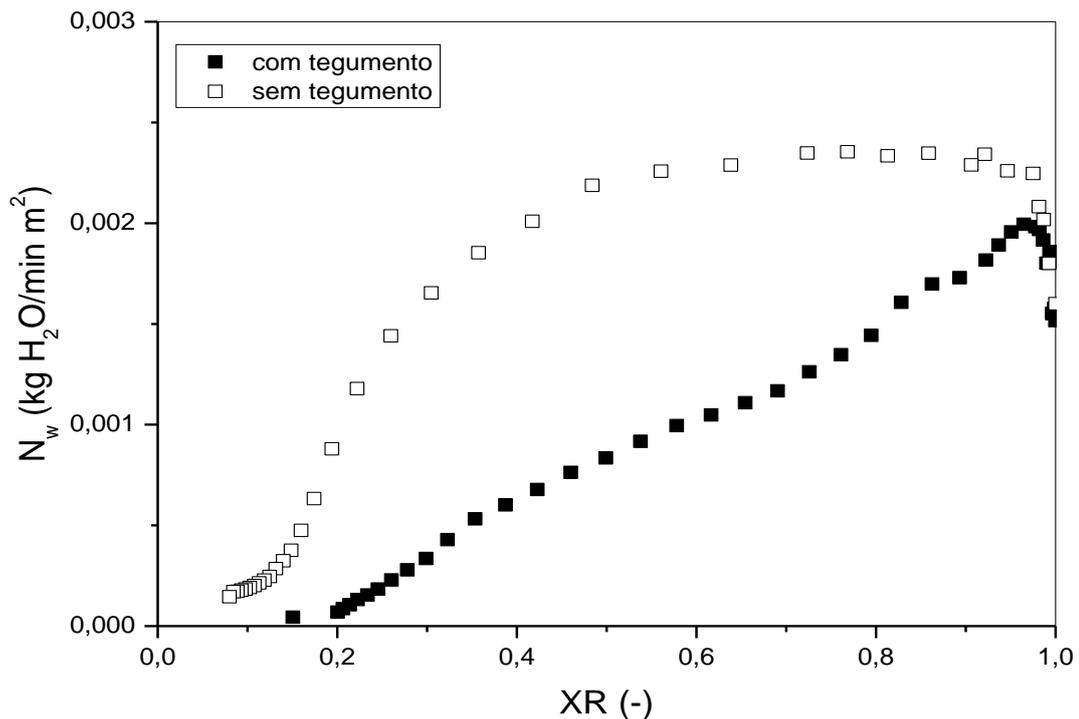


Figura 4-18: Densidade de fluxo de umidade das sementes de moringa com e sem tegumento em função do adimensional de umidade, para $T_{IR} = 90^{\circ}\text{C}$.

Como o tegumento é uma parede celular semipermeável, sua presença constitui um obstáculo a transferência de massa, dificultando a difusão da umidade do interior para a superfície das sementes, principalmente com o decorrer do tempo de secagem, levando a menores densidades de fluxo de umidade, e conseqüentemente a um processo de secagem mais lento.

4.3.4 *Difusividades mássicas efetivas*

Na Tabela 4-3 estão os valores do coeficiente de difusão para as sementes de moringa com e sem tegumento, estimados negligenciando e considerando o encolhimento.

Os resultados apresentados na Tabela 4-3 evidenciam a influência da consideração do encolhimento sobre os valores de difusividade efetiva. Nota-se que os valores de difusividade mássica efetiva nas sementes sem tegumento, estimados levando em conta o encolhimento das partículas, foram significativamente menores que aqueles estimados sem considerar o fenômeno. Por exemplo, nas temperaturas da fonte de 90, 120 e 160°C a redução no parâmetro de transferência de massa é de até 61, 55 e 57%, respectivamente.

Tabela 4-3: Coeficientes de difusão estimados durante o processo de secagem das sementes de moringa com e sem tegumento, sem considerar e considerando o encolhimento.

MODELO DIFUSIVO						
Sem Encolhimento						
	Moringa sem tegumento			Moringa com tegumento		
T(°C)	90	120	160	90	120	160
R ²	0,993	0,960	0,984	0,976	0,989	0,990
D _{ef} x10 ¹¹ (m ² s ⁻¹)	5,18±0,11	7,91 ± 0,86	10,5 ± 0,2	6,62 ± 0,46	10,9 ± 0,2	16,9 ± 0,1
Com Encolhimento						
	Moringa sem tegumento			Moringa com tegumento		
T(°C)	90	120	160	90	120	160
R ²	0,982	0,985	0,990	0,976	0,987	0,940
D _{ef} x10 ¹¹ (m ² s ⁻¹)	2,03±0,33	3,59 ± 0,29	5,11 ± 0,23	5,86 ± 0,33	9,75 ± 0,21	15,00 ± 1,32

Como a contração de volume das sementes com tegumento foi menor em comparação com as sem tegumento, o impacto sobre D_{ef} também foi menor, havendo uma redução de apenas 11% em toda a faixa operacional investigada.

A retração da semente diminui o caminho da difusão de umidade, ou seja, leva a uma redução da distância exigida para o movimento das moléculas de água. Ao negligenciar esse fenômeno, a taxa de transferência de massa por difusão é superestimada, levando a maiores valores de difusividade efetiva. Isto está de acordo com os resultados reportados por outros autores: Santos (2009) para sementes de girassol, Goneli *et al.* (2011) mamona, Ponkham *et al.* (2012) para abacaxi, Siqueira *et al.* (2012) e Silva Neto *et al.* (2014) para pinhão-manso.

Considerando o encolhimento das partículas durante a secagem, os valores D_{ef} para as sementes de moringa com tegumento submetidas as temperaturas da fonte IV de 90 a 160°C variaram entre 5,86 x 10⁻¹¹ e 15,0 x 10⁻¹¹ m²s⁻¹, enquanto para as sementes sem tegumento estiveram na faixa de 2,03 x 10⁻¹¹ a 5,11 x 10⁻¹¹ m²s⁻¹. Os valores obtidos para a difusividade estão dentro da faixa de 10⁻¹¹ a 10⁻⁹ m²/s relatadas para produtos agrícolas (BARBOSA NETO *et al.*, 2014).

Na faixa investigada, o coeficiente de difusão efetiva das sementes sem tegumento foi, aproximadamente, 65% menor que aquele das sementes com tegumento. Isto pode ser atribuído às diferentes magnitudes de encolhimento, que afetam o tamanho e a estrutura interna porosa

das partículas, fatores que exercem um papel fundamental sobre a difusividade mássica efetiva (Srinivasakannan & Balasubramaniam, 2009). Conforme apresentado anteriormente, nas sementes com tegumento tendem a se tornar mais porosas durante a secagem, facilitando a movimentação interna de umidade.

A difusividade mássica efetiva na secagem IV aumentou com o aumento da temperatura da fonte, à medida que maior é o fluxo de energia radiante aplicada ao produto e maior é a energia absorvida que é utilizada para aquecer o material e vaporizar a umidade, fator crucial para intensificar as taxas de transferência e acelerar o processo.

Resultados similares sobre a difusividade efetiva também foi observada por alguns autores na literatura. Niamnuy *et al.* (2012) em seu trabalho sobre a secagem de soja em secador infravermelho verificaram que a elevação da temperatura de (50 para 150)°C permitiu um aumento da Def de (5,14 para 18,5) $\times 10^{-9}$ m²/s. Nascimento (2014) também obteve um aumento da difusividade (6,44 para 9,89) $\times 10^{-10}$ devido ao aumento da temperatura de (30 para 60)°C na secagem convectiva com aplicação de infravermelho em grãos de moringa.

Cabe destacar que no trabalho de Nascimento (2014), o teor de umidade inicial das sementes de moringa foi em torno de 13% b.u., bem inferior aos das utilizadas no presente trabalho.

A dependência da difusividade efetiva com a temperatura obedeceu a “lei” de Arrhenius, com coeficientes de determinação de 0,9952 e 0,9752, para sementes com e sem tegumento, respectivamente. As energias de ativação para as sementes com e sem tegumento foram de 16,87 e 15,69 kJ/mol, respectivamente, as quais estão dentro da faixa de 15 a 45 kJ/mol reportada por diferentes autores para vários produtos agrícolas (Barbosa Neto *et al.*, 2014).

4.3.5 Discriminação das equações de secagem

Os parâmetros das equações ajustadas aos dados de secagem em camada fina de sementes de *Moringa oleífera* L., com e sem tegumento, parametrizados nas temperaturas da fonte de aquecimento de 90, 120 e 160°C, para as equações matemáticas, encontram-se listados na Tabela 4-4.

Analisando o comportamento das equações nota-se que o parâmetro k , cujo inverso está relacionado a resistência interna do produto, aumentou com a temperatura. Esse resultado reforça a ideia da predominância do processo difusivo na secagem das sementes de moringa.

O parâmetro n representa o efeito das condições externas à secagem (Vieira, 2006). Sua variação pode depender do tipo de produto e da temperatura em que ocorre o processo de secagem. As sementes de moringa com tegumento apresentaram valores de n maiores que os encontrados para as sementes de moringa sem tegumento o que mais uma vez indica que o tegumento serviu como uma barreira protetora como afirmado por Rocha (2012), causando uma maior resistência a transferência de massa.

Tabela 4-4: Parâmetros de ajuste das equações de secagem

EQUAÇÃO DE LEWIS						
	Moringa sem tegumento			Moringa com tegumento		
T(°C)	90	120	160	90	120	160
K(min ⁻¹)	0,0026	0,0045	0,0072	0,0018	0,0031	0,0052
DRM	0,0641	0,0367	0,1066	0,0706	0,0242	0,0736
R ²	0,9813	0,9926	0,9934	0,9978	0,9979	0,9935
EQUAÇÃO DE PAGE						
	Moringa sem tegumento			Moringa com tegumento		
T(°C)	90	120	160	90	120	160
K(min ⁻¹)	0,0316	0,01705	0,0081	0,0027	0,0021	0,0016
DRM	0,0150	0,0649	0,2937	0,0204	0,0612	0,0087
R ²	0,9928	0,9928	0,9935	0,9982	0,9986	0,9997
n	0,5780	0,7397	0,9759	1,3163	1,0667	1,2284
EQUAÇÃO DE BROOKER						
	Moringa sem tegumento			Moringa com tegumento		
T(°C)	90	120	160	90	120	160
K(min ⁻¹)	0,0028	0,0046	0,0073	0,0019	0,0031	0,0054
DRM	0,0254	0,0188	0,0817	0,0012	0,0024	0,0230
R ²	0,9841	0,9929	0,9935	0,9907	0,9982	0,9953
c	1,0435	1,0143	1,0119	1,0545	1,0128	1,0343

A Figura 4-19 mostra as curvas das quatro equações semi-empíricas ajustadas aos dados de secagem de sementes com tegumento para a temperatura de 160°C.

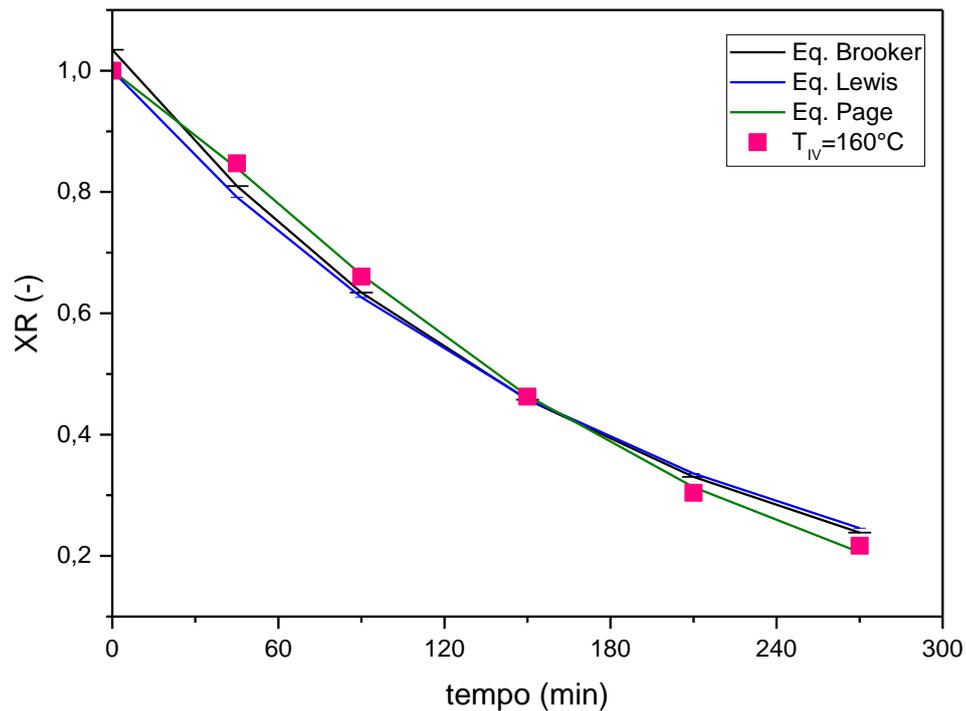


Figura 4-19: Curvas de secagem experimentais e preditas pelas equações semi-empíricas para as sementes de moringa com tegumento expostas à temperatura da fonte de aquecimento IV de 160°C.

Analisando as curvas apresentadas na Figura 4-19 nota-se que a equação que melhor representa os dados da cinética de secagem é a de Page, o que está de acordo com os resultados encontrados para secagem de diversos produtos agrícolas, principalmente grãos e sementes (PEREIRA, 2010; PESSOA *et al*, 2011).

Logo, a equação de Page é a equação mais recomendada para representar o processo de secagem de sementes de *Moringa oleífera* L. nas condições estudadas.

4.4 ASPECTOS ENERGÉTICOS

As alterações no índice relacionado à eficiência energética do processo com o teor de umidade adimensional durante a secagem IV das sementes de moringa, com e sem tegumento, são apresentados nas Figuras 4-20 e 4-21, respectivamente.

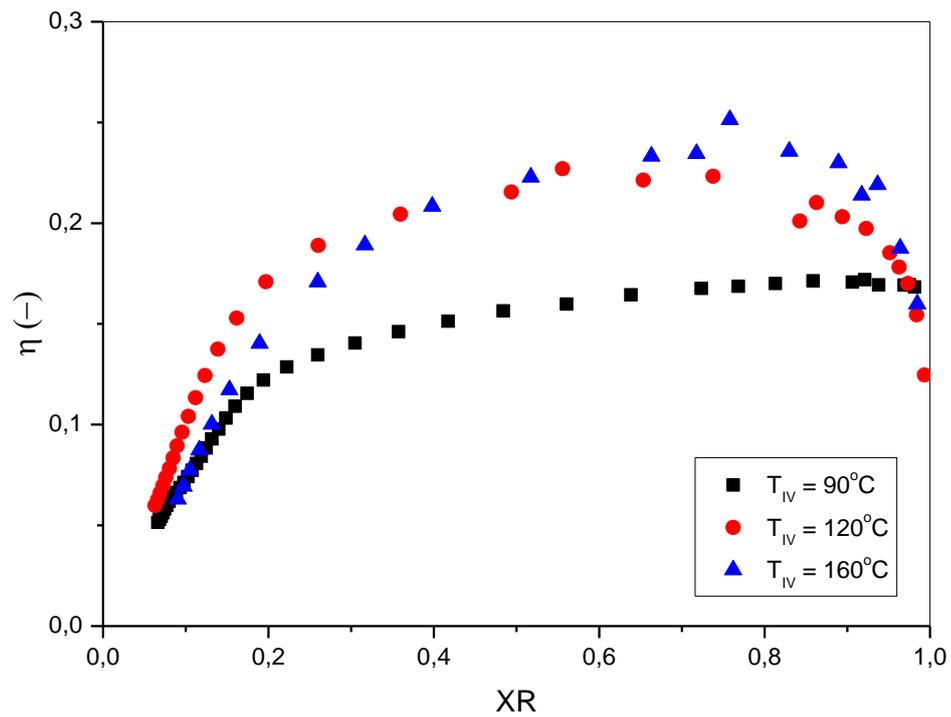


Figura 4-20: Eficiência energética em função do adimensional de umidade, durante a secagem IV de sementes de moringa sem tegumento.

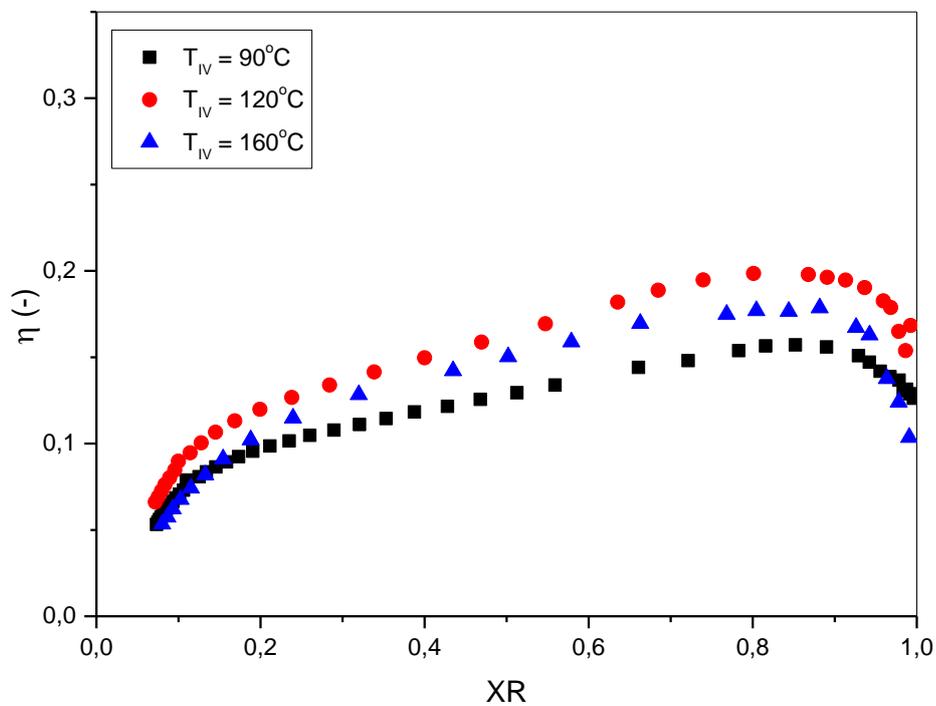


Figura 4-21: Eficiência energética em função do adimensional de umidade, durante a secagem IV de sementes de moringa com tegumento.

Verifica-se que o comportamento apresentado pela eficiência energética do processo segue o comportamento de secagem do material. No início do processo, correspondente ao período de aquecimento, ocorre um aumento da eficiência, seguido de um período no qual observa-se um platô, no qual a eficiência permanece praticamente constante e parece estar associada a um fluxo de umidade constante. Cabe ressaltar ainda que neste período a eficiência atinge o maior valor, indicando uma maior absorção da energia radiante. Com a remoção de umidade no período de taxa decrescente, a energia absorvida pelas sementes diminuiu, aumentando a energia radiante refletida e, reduzindo, portanto, a eficiência do processo.

Cabe ressaltar que para sementes com tegumento (Figura 4-21), a maior eficiência foi observada em $T_{IV} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ e não em $160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Isto pode ser atribuído ao fato de que nos testes conduzidos com $T_{IV} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ o teor de umidade inicial das sementes foi menor, em torno de 0,9 b.s, enquanto em $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi de 1,4 b.s. Logo, menor foi a quantidade de água evaporada, o que afetou a eficiência do processo.

Os valores médios do consumo total de energia radiante, bem como a energia específica utilizada e as perdas ocorridas estão apresentados na Tabela 4-5. Estes foram obtidos levando em consideração o tempo necessário para o material atingir um teor de umidade de 10% (b.u.).

Tabela 4-5: Consumo de energia na secagem infravermelho de sementes de moringa.

T_r ($^{\circ}\text{C}$)	Moringa com tegumento				Moringa sem tegumento			
	t (min)	E_{IV} (kJ)	E_e (MJ/kg)	E_{perdas} (MJ/kg)	t (min)	E_{IV} (kJ)	E_e (MJ/kg)	E_{perdas} (MJ/kg)
90	960	641,3	$45,8 \pm 3,6$	$43,0 \pm 3,6$	990	661,4	$46,5 \pm 1,6$	$43,7 \pm 1,6$
120	540	578,2	$37,8 \pm 0,9$	$35,1 \pm 0,9$	600	550,7	$41,6 \pm 2,1$	$38,9 \pm 2,1$
160	270	385,0	$36,6 \pm 1,0$	$35,4 \pm 1,0$	300	405,0	$38,7 \pm 2,2$	$35,9 \pm 2,3$

Para ambos os tipos de sementes verifica-se que quanto maior a temperatura da fonte de aquecimento IV, menor é a demanda de energia do secador. Conforme discutido anteriormente, o aumento da T_{IV} leva a maiores taxas de remoção de umidade, reduzindo o tempo de secagem e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de energia. Resultados similares foram reportados por Montevali *et al.* (2011) ao avaliar aspectos de energia de diferentes métodos de secagem.

A secagem IV das sementes com tegumento realizada com $T_{IV}=160^{\circ}\text{C}$ teve um consumo de energia específica 20% menor que aquele observado para $T_{IV}=90^{\circ}\text{C}$. Ao remover o tegumento essa redução foi de 17%. Nota-se também que as perdas de energia diminuíram entre 18 e 20% ao se intensificar o processo por meio do aumento da temperatura da fonte.

4.5 EFEITOS DA SECAGEM IV SOBRE ATRIBUTOS DE QUALIDADE DAS SEMENTES

A qualidade do produto seco é uma consideração básica na seleção de um método adequado de secagem de qualquer material. Particularmente, para sementes de moringa, a viabilidade fisiológica e a cor do produto são atributos importantes para serem avaliados. O primeiro quando o uso da semente é destinado para a propagação da espécie. O segundo, quando a aplicação é voltada para a extração de óleo, à medida que as alterações de cor podem indicar a ocorrência de reações de degradação enzimática ou não enzimática, e até mesmo de reações de oxidação lipídica.

4.5.1 *Viabilidade fisiológica*

No teste realizado utilizando sal de tetrazólio como corante, os embriões de todas as sementes de moringa, com e sem tegumento, submetidas ao processo de secagem em diferentes intensidades de radiação infravermelho, coloriram completamente, mantendo ainda seus tecidos firmes. Isto indica que após a secagem as sementes mantiveram-se 100% viáveis.

Nas condições de aquecimento IV com temperaturas da lâmpada de 90, 120 e 160°C, as sementes atingiram temperaturas em torno de 40, 52 e 65°C, respectivamente. A partir desse teste é possível afirmar que as temperaturas trabalhadas, não afetaram a qualidade fisiológica das sementes de moringa. Ou seja, estas apresentam grande tolerância à secagem, o que confirma sua grande capacidade de preservação da qualidade fisiológica, conforme relatado por Miamoto *et al.* (2010).

4.5.2 Atributos de cor

Como mencionado na seção 2.5.2 da revisão bibliográfica, a cor dos produtos tem grande influência na sua aceitabilidade, pois a avaliação da qualidade de produtos submetidos à secagem, por parte dos consumidores, geralmente é realizada com base em suas características visuais. Além da aceitabilidade do consumidor, a cor do produto também vem sendo usada para monitorar o processo.

A Tabela 4-6 apresenta os resultados dos parâmetros de cor obtidos para as sementes de moringa *in natura* e secas sob as diferentes condições de aquecimento IV investigadas, a partir dos quais é possível avaliar o impacto do processo sobre a degradação da cor do produto.

Tabela 4-6: Parâmetros de cor, obtidos para as sementes de moringa com e sem tegumento *in natura*, e após os processos de secagem, sob diferentes temperaturas da fonte de aquecimento.

Moringa com tegumento					
	L^*	a^*	b^*	h^*	ΔE^*
<i>in natura</i>	52,51 ± 4,16	-0,55 ± 0,65	25,42 ± 1,73	91,2 ± 1,4	0
90°C	52,76 ± 0,65	10,25 ± 0,62	25,62 ± 0,94	68,2 ± 0,3	10,8 ± 3,6
120°C	36,58 ± 0,61	10,11 ± 0,24	25,34 ± 0,04	68,1 ± 0,3	19,2 ± 3,9
160°C	41,08 ± 1,68	10,08 ± 0,55	26,82 ± 0,79	69,3 ± 0,5	15,6 ± 2,7
Moringa sem tegumento					
	L^*	a^*	b^*	h^*	ΔE^*
<i>in natura</i>	56,90 ± 2,41	1,48 ± 0,05	30,23 ± 1,84	87,1 ± 0,2	0
90°C	42,58 ± 0,50	6,31 ± 0,10	21,25 ± 0,34	72,6 ± 0,8	17,6 ± 2,4
120°C	43,01 ± 0,87	6,83 ± 0,72	16,03 ± 0,53	65,8 ± 0,3	20,6 ± 2,1
160°C	43,54 ± 1,06	6,31 ± 0,36	16,37 ± 0,29	68,9 ± 0,5	19,8 ± 1,5

Para as sementes com tegumento, os valores de L^* obtidos da amostra submetida à secagem com temperatura da fonte de 90°C não foram significativamente diferentes daqueles observados para as sementes de moringa *in natura*. Resultados semelhantes foram relatados por Tasirin *et al.* em (2014) para folhas de limão e Ali *et al* (2014) para folhas de moringa oleífera, onde as menores temperaturas proporcionam valores de L^* próximos ao do produto *in natura*.

As sementes de moringa com tegumento *in natura* e secas a 120 e 160 °C foram mais escuras que as sementes sem tegumento, mostrando valores de L* significativamente inferiores. O “kernel” é caracterizado por concentrar a fração lipídica presente na semente de moringa, e de acordo com Kahyaoglu e Kaya em (2006), os lipídeos possuem elevada capacidade de espalhar a luz. Logo, ao remover o tegumento, essa fração lipídica tende a ficar mais exposta, contribuindo para uma maior luminosidade. As sementes de moringa sem tegumento, *in natura* e secas a 120 e 160°C tiveram luminosidades 8,4, 20,7 e 6,1% maiores que as sementes com este revestimento.

Em contraste, o valor médio do parâmetro L* para as sementes sem tegumento secas por IV a 90°C foi menor que aquele apresentado pelas sementes com tegumento secas na mesma condição. A remoção do tegumento, que auxilia na proteção da semente, leva a uma maior exposição do núcleo rico em óleo. Isto aliado ao longo tempo do processo de secagem pode ter favorecido a oxidação lipídica e a conseqüente redução na luminosidade da semente sem tegumento.

Em ambas as sementes houve aumento nos valores do parâmetro a* após a secagem, não havendo influência significativa da temperatura da fonte de aquecimento IV. Esse aumento nos valores de a* denotam uma redução na cor verde ou desenvolvimento da cor vermelha, o que pode ser um indicador de degradação de constituintes das sementes ou seu escurecimento. A temperatura do material, especialmente nos estágios finais de secagem, causa reações de degradação enzimática e não enzimática. A secagem com temperatura das sementes excedendo 45°C tende a acelerar essas reações, provocando escurecimento do produto.

As maiores alterações no parâmetro a* foram observadas nas sementes com tegumento. Em $T_{IV} = 90^{\circ}\text{C}$, o valor de a* dessas sementes aumentou de -0,55 para 10,25. Ao remover o tegumento, o aumento ocorrido foi de 1,48 para 6,31.

Com respeito ao parâmetro b*, as sementes com e sem tegumento apresentaram comportamentos distintos. Enquanto aquelas cujo revestimento foi removido tiveram uma redução nos valores de b*, e, portanto, perdas em sua cor amarela após o processo de secagem, as sementes com tegumento secas por IV não apresentaram alterações significativas em relação às amostras *in natura*, o que comprova o efeito protetor do tegumento que evitou uma maior variação da cor do produto. As diferenças entre os valores obtidos nas diferentes temperaturas empregadas não foram significativas.

Barzegar *et al.* (2015) avaliaram a variação dos parâmetros de cor de ervilhas submetidas a secagem, foi relatado que o b^* aumentou com intensidade da radiação IV, o que não foi verificado nesse estudo.

Quando as sementes foram secas sem o tegumento e com $T_{IV} = 90^{\circ}\text{C}$, o maior valor médio de h^* foi exibido em comparação com as outras amostras. Isso implica que nas condições especificadas, as sementes apresentam valores de coloração mais próximos das sementes *in natura*.

Analisando os valores de variação total da cor (ΔE^*) das sementes de moringa apresentados na Tabela 4.6, nota-se que a maior degradação de cor, tanto das sementes com tegumento como sem tegumento, foi observada após a secagem com $T_{IV} = 120^{\circ}\text{C}$, enquanto a menor degradação foi observada ao submeter as sementes à menor intensidade de radiação IV, como esperado.

Para explicar os resultados obtidos deve-se procurar estabelecer a correlação entre as alterações de cor observadas e a quantidade de energia radiante fornecida à amostra até esta atingir 10% b.u., a qual está diretamente relacionada com duas variáveis importantes do processo: a temperatura do material e a taxa de secagem, conforme reportado por Nowak & Lewicki (2005).

As sementes de moringa submetidas ao aquecimento IV com temperatura da fonte de 90°C atingiram a menor temperatura, em torno de 40°C , o que contribuiu para uma maior preservação da cor do produto.

Por sua vez, quando a temperatura das sementes excede 45°C , a taxa de secagem e, por conseguinte, o tempo do processo passam a ser variáveis relevantes. Isto porque apesar da menor temperatura final das sementes (em torno de 52°C) após a secagem com $T_{IV} = 120^{\circ}\text{C}$, em comparação com os 65°C das sementes secas com $T_{IV} = 160^{\circ}\text{C}$, as menores taxas de secagem obtidas aumentaram o tempo de residência das sementes no secador, fazendo com que ficassem com temperaturas elevadas por uma maior período, o que contribuiu para as reações de degradação e para a deterioração da cor do produto, conforme evidenciado pelo aumento do parâmetro a^* e pelas reduções dos parâmetros L^* , b^* e *hue*.

Por exemplo, para sementes com tegumento submetidas à secagem com $T_{IV} = 120^{\circ}\text{C}$ 3 horas a mais foram necessárias em relação à $T_{IV} = 160^{\circ}\text{C}$ para atingir o teor de umidade alvo

de 10% b.u.. Como resultado, na secagem a 160°C menores valores de ΔE foram obtidos, indicando uma menor degradação da cor das sementes, devido ao menor tempo de secagem requerido para as sementes atingirem a umidade de 10% b.u.

Com base nos resultados obtidos verifica-se, portanto, que para secar sementes de moringa, com ou sem tegumento, e evitar deterioração da cor do produto, associada à degradação de seus componentes, recomenda-se o uso de intensidades de radiação que resultem ou em temperaturas do material inferiores a 40°C, ou em condições de secagem rápida.

Comparando os valores de ΔE das sementes com e sem tegumento verifica-se que a alteração de cor nas sementes sem tegumento foi maior que a apresentada pelas sementes revestidas em toda a faixa experimental investigada. A remoção do tegumento (que auxilia na proteção da semente) acarretou na maior degradação dos constituintes do “kernel”, favorecendo o seu escurecimento.

Logo, “parece” adequado usar sementes de moringa com tegumento para melhor preservar a cor do produto in natura.

Na Figura 4-22 é apresentado o comportamento do ângulo hue em função da temperatura e do teor de umidade das sementes sem tegumento secas com $T_{IV} = 120^\circ\text{C}$. A Figura 4-23 mostra imagens dessas sementes, a partir das quais é possível ter a impressão visual das alterações de cor do material em diferentes tempos do processo, associadas a diferentes valores do ângulo hue.

De acordo com o sistema CIELAB, um valor de ângulo hue igual a 0° representa o vermelho puro, enquanto 180° representa o verde puro. Se o ângulo estiver entre 0° e 90° , quanto maior este for, mais amarela é a tonalidade, e quanto menor for, mais avermelhada é a tonalidade. A partir das Figuras 4-22 e 4-23 verifica-se que o valor do ângulo hue obtido para as sementes de moringa in natura foi ligeiramente superior a 90° , denotando uma coloração amarelo-esverdeada. À medida que o teor de umidade do material é reduzido durante a secagem de 66 para 10% b.u., pode ser observada uma redução nos valores do ângulo hue de $91,5^\circ$ para $65,6^\circ$, mostrando que as sementes passam da tonalidade amarela para a alaranjada. Isto pode ser um indicativo da degradação de carotenoides durante o processo de secagem

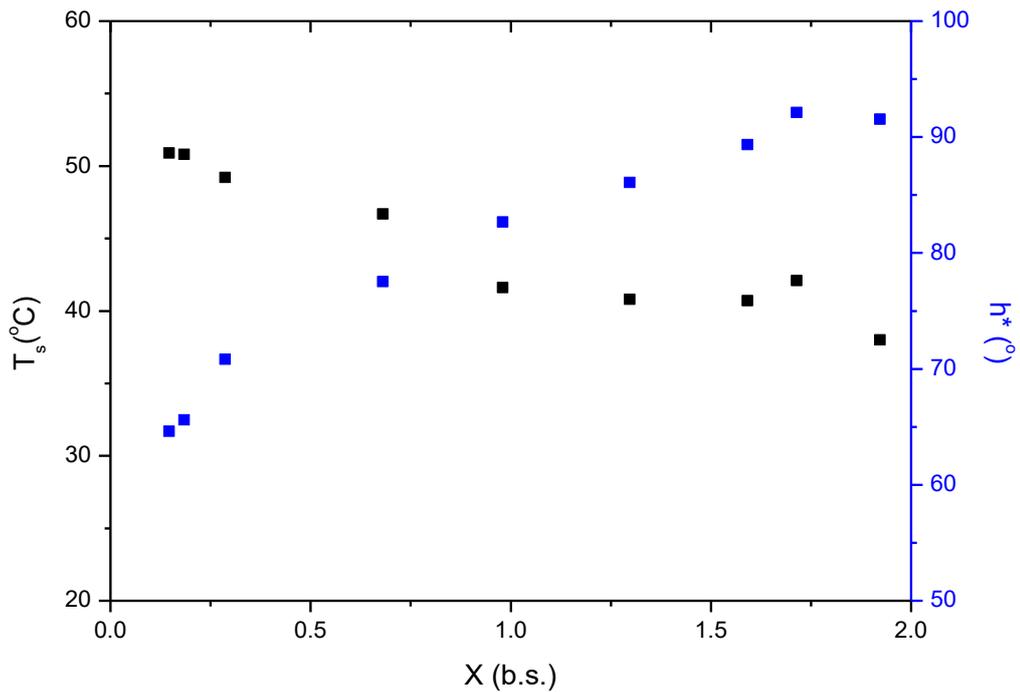
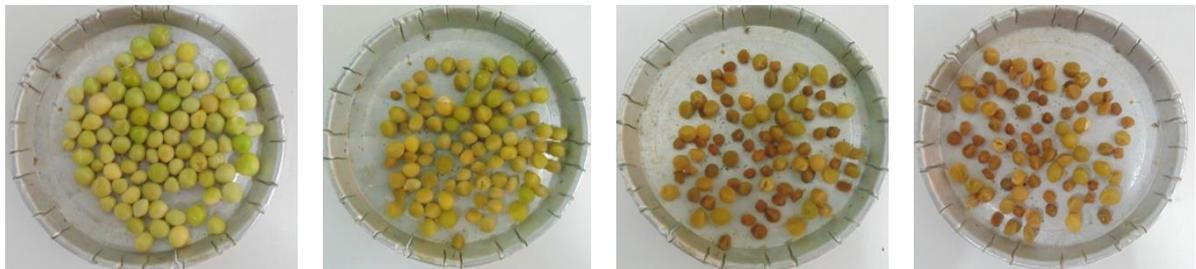


Figura 4-22: Ângulo hue em função da temperatura e teor de umidade das sementes sem tegumento secas com $T_{IV} = 120^\circ\text{C}$.



(a) $h^* = 91,5^\circ$

$X = 66\% \text{ bu}$

(b) $h^* = 82,7^\circ$

$X = 49\% \text{ bu}$

(c) $h^* = 70,8^\circ$

$X = 22\% \text{ bu}$

(d) $h^* = 65,6^\circ$

$X = 10\% \text{ bu}$

Figura 4-23: Imagens das sementes de moringa sem tegumento durante a secagem com $T_{IV} = 120^\circ\text{C}$.

Os valores de h^* diminuem com o aumento da temperatura da semente e redução do teor de umidade ao longo do processo (Figura 4-22). No fim da secagem há um escurecimento visualmente aparente na superfície das sementes (Figura 4-23). O grau de escurecimento em menores teores de umidade foi proporcional ao tempo de residência no secador e à temperatura atingida pelo material.

Ademais o escurecimento das sementes foi adequadamente relacionado com os valores experimentais do ângulo hue, que mostrou ser um atributo que pode expressar a impressão ótica das alterações de cor do produto durante a secagem IV.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu contribuir com informações acerca de algumas características físicas das sementes de moringa, da influência do tegumento e encolhimento das partículas sobre a cinética de secagem do material, bem como das alterações de atributos de qualidade das sementes expostas à radiação IV. Informações estas que ainda não são tão exploradas e abordadas na literatura.

A secagem IV de sementes de moringa em camada fina foi caracterizada por reduções de volume e área superficial das partículas, as quais mostraram-se dependentes apenas do adimensional de umidade e da estrutura da semente (com e sem tegumento). Nas condições utilizadas neste trabalho, a temperatura da fonte IV teve efeito desprezível sobre o encolhimento das sementes de moringa.

A contração de volume das partículas foi limitada pela presença do tegumento recobrando as sementes, o qual tende perder rapidamente sua mobilidade, devido à secagem superficial via IV, apresentando “case hardening”.

A remoção do tegumento leva à obtenção de um produto mais denso após a secagem, em razão do encolhimento (em torno de 60%) apresentado pelas sementes sem tegumento.

Negligenciar a ocorrência do fenômeno de encolhimento levou a uma interpretação errônea dos períodos de secagem, a uma superestimação da difusividade efetiva e, conseqüentemente das taxas de transferência de massa.

O comportamento de secagem das sementes foi caracterizado pela presença dos períodos de aquecimento, fluxo constante e fluxo decrescente. O período de fluxo decrescente muito comum em produtos agrícolas predominou em todas as condições de temperatura, indicando que as resistências internas à transferência de massa governam o processo de secagem, principalmente nas sementes com tegumento, o qual atuou como uma resistência extra, dificultando a penetração da radiação no interior da semente, bem como, a migração da umidade do interior para a superfície.

A difusividade efetiva de umidade variou de $(5,86 \text{ a } 15,00) \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ para sementes de moringa com tegumento e de $(2,03 \text{ a } 5,11) \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ para sementes sem tegumento. Os

valores de energia de ativação obtidos para a difusão de umidade nas sementes com e sem tegumento foram de 16,87 e 15,69 kJ/mol, respectivamente.

Dentre as equações semi-empíricas utilizadas, a equação de Page mostrou-se a mais adequada para representar a cinética de secagem de ambos os tipos de sementes.

A temperatura da fonte de aquecimento foi o principal fator influenciando o consumo de energia. Uma maior temperatura aumentou o fluxo de energia radiante emitida, diminuindo significativamente o tempo de secagem, resultando numa economia de até 20% no consumo de energia.

A eficiência energética do processo foi alta durante os estágios iniciais de secagem, os quais resultaram numa maior absorção de energia radiante pelas sementes.

O consumo de energia específica ficou na faixa de 36,4 a 45,8 MJ kg⁻¹ água evaporada para sementes com tegumento, e na faixa de 38,7 a 46,5 MJ kg⁻¹ para sementes sem tegumento. Não havendo, portanto, diferenças significativas (1,52% a 6,32%) no requerimento de energia para secagem IV dessas sementes.

As temperaturas da fonte de aquecimento empregadas, não influenciaram a viabilidade fisiológica das sementes, entretanto causaram alterações nos atributos de cor em ambas as sementes.

Para minimizar a deterioração da cor do produto, associada à degradação de seus componentes, recomenda-se o uso de intensidades de radiação que resultem ou em temperaturas do material inferiores a 40°C, ou em condições de secagem rápidas. A presença do tegumento contribuiu também para uma menor alteração de cor do produto.

O ângulo hue mostrou ser um atributo adequado para expressar a impressão ótica do escurecimento durante a secagem.

Com base nos aspectos relacionados à transferência de massa, consumo de energia e qualidade do produto investigados neste trabalho, a condição operacional mais adequada para secar as sementes de moringa via radiação IV foi obtida com temperatura da fonte de 160°C, sendo esta, portanto, recomendada para a obtenção de sementes com maior preservação de seus atributos de qualidade, em baixos tempos de processo e menor custo de energia.

Finalmente, é possível concluir que de fato o processo de secagem das sementes de moringa é caracterizado pela contração volumétrica e superficial destas. As temperaturas da fonte de aquecimento empregadas nesse trabalho e conseqüentemente o tempo de secagem foram capazes de influenciar no escurecimento do material. Já a presença do tegumento, por sua vez, acarretou em um produto com um menor encolhimento e degradação dos seus constituintes, comprovando que realmente o tegumento serve como uma camada que interfere nas transferências simultâneas que ocorrem durante a secagem e que protege as sementes

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHANTA, S.; OKOS, M.R.; CUSHMAN, J.H.; KESSLER, D.P. Moisture transport in shrinking gels during saturated drying. **AIChE Journal**, v. 43, n. 8, p. 2112-2122, 1997.

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C.; ANDRADE, E. T. Análise da variação das propriedades físicas e contração volumétrica dos grãos de milheto (*Pennisetum glaucum*) durante o processo de dessecção. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.25, n.1, p.15-21, 2000.

AKIYAMA. T.;HAYAKAWA. K.,Heat and moisture transfer and hygrophysical changes in elastoplastic hollow cylinder-food during drying, **Journal of Food Science**, v. 65, n. 2, p. 315–323, 2000.

ALI, M. A., YUSOF, Y. A., CHIN, N. L., IBRAHIM, M. N., & BASRA, S. M. Drying kinetics and colour analysis of Moringa oleífera leaves. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v 2, 394 – 400, 2014.

ARAICA, B. M.; SPÖRNDLY, R.; SÁNCHEZ, N. R.; SPÖRNDLY, E. Moringa (*Moringa oleífera*) leaf meal as source of protein in locally produced concentrates for dairy cows fed low protein diets in tropical áreas. **Livestock Science**, V. 137, n. 1 – 3, p. 10 – 17, 2011.

ARAÚJO, W. D., GONELI, A. L., SOUZA, C. M., GONÇALVES, A. A., & VILHASANTI, C. B. (2014). Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n. 18, v.3, p. 270 – 286, 2014.

ARGYROPOULOS, D., & MÜLLER, J. Kinetics of change in colour and rosmarinic acid equivalents during convective drying of lemon balm (*Melissa officinalis* L.). **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, 1(1), e15 - e22. 2014.

ARRIECHE, L. S. **Evolução da forma e encolhimento de um sistema gel durante a secagem por convecção forçada**. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 2003.

AVIARA, N. A.; POWER, P. P.; ABBAS, T. Moisture – dependente physical properties of *Moringa oleífera* seed relevant in bulk handling and mechanical processing. **Industrial Crops and Products**, n. 42, p. 96 – 104, 2013.

BARBOSA NETO, A., MARQUES, L. G., PRADO, M. M., & SARTORI, D. J. Mass Transfer in Infrared Drying of Gel - Coated Seeds. **Advances in Chemical Engineering and Science**, 4, 39 -48. 2014.

BARROZO, M. A. S. **Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamento**. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 1995.

BARZEGAR, M., ZARE, D., & STROSHINE, R. An integrated energy and quality approach to aptimization of green peas drying in a hot air infrared - assisted vibratory bed dryer. **Journal of Food Engineering**, 166, 302 – 315, 2015.

BATISTA, L. M. **Secagem de quitosana obtida a partir de resíduos de camarão: análise da cinética de secagem considerando encolhimento**. 2004. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Alimentos, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS, Brasil, 2004.

BELTRÃO, N. E. M.; OLIVEIRA, M. I. P. Oleaginosas e seus óleos: vantagens e desvantagens para a produção de biodiesel, *EMBRAPA ALGODÃO*. Campina Grande, PB. 2008.

BERNSTEIN, A.; NOREÑA, C.P.Z. Study of Thermodynamic, Structural, and Quality Properties of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) During Drying. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, p. 148-160, 2014.

BEZERRA, A. M. E.; FILHO, S. M.; FREITAS, J. B. S.; TEÓFILO, E. M. Avaliação da qualidade das sementes de *Moringa oleífera* Lam. durante o armazenamento. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 28, n. 6, 2004.

BIALOBRZESKI, I., ZIELINSKA, M., MUJUMDAR, A. S., & MARKOWSKI, M. Heat and mass transfer during drying of bed of shrinkage particles - simulation for carrot cubes dried in a spout - fluidized - bed drier. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, n. (19 - 20), 4704 – 4716, 2008.

BRASIELLO, A.; ADILETTA, GUISEPPINA.; RUSSO, P.; CRSCITELLI, S.; ALBANESE, D.; MATTEO, M. D. Mathematical modeling of eggplant drying: Shrinkage effect. **Jornal of Foof Engineering**, v. 114, n. 1, p. 99 – 105, 2013.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF, 2009. Disponível na internet via www url: http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/2946_regras_analise__sementes.pdf.> Acesso em: 05 jun 2014.

BROWN, W. H. Useful plants of the Philippines. Vol. 2. Manilla: Bureau of printing, 1950.

BURMESTER, K.; EGGERS, R. Heat and mass transfer during the coffee drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 99, n. 4, p. 430–436, 2010.

CELMA, A. R.; ROJAS, S.; LOPEZ – RODRIGUEZ, F. Mathematical modelling of thin – layer infrared drying of wet olive husk. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 47, n 9 – 10, p. 1810 – 1818. 2008.

CURCIO, S.; AVERSA, M. Influence of shrinkage on convective drying of fresh vegetables: a theoretical model. **Journal of Food Engineering**, v. 123, p. 36 – 49, 2014.

DARVISHI, H.; KHOSHTAGHAZA, M. H.; MINAEI, S. Effects of fluidized bed drying on the quality of soybean kernels. **Journal of the Saudi of Agricultural Sciences**, 2014.

DELGADO T., PEREIRA J.A., BAPTISTA P.,CASAL S., RAMALHOSA E. Shell´s influence on drying kinetics, color and volumetric shrinkage of castanea sativa Mill.fruits. **Food Research International**, v.55, p. 426-435, 2014.

DISSA, A.O.; DESMORIEUX, H.; BATHIEBO, J.; KOULIDIATI, J. Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage. **Journal of Food Engineering**, v. 88, n. 4, p. 429–437, 2008.

DISSA, A.O.; DESMORIEUX, H.; SAVADOGO, P.W.; SEGDA, B. G.; KOULIDIATI, J. Shrinkage, porosity and density behaviour during convective drying of spirulina. **Journal of Food Engineering**, v. 97, n. 3, p. 410–418, 2010.

ESNARRIAGA, E. S. **Influência de sementes trituradas de Moringa oleífera no tratamento de efluente bruto de fossa séptica biodigestor**. 2010. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Pós –Graduação *Lato Sensu* em Química), Universidade Federal de Lavras – MG, Corumbá – MS. 2010.

FASINA, O., PICKARD, M., ZHENG, G., & WANG, N. Effect of infrared heating on the properties of legume seeds. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 36, p. 79 – 90, 2001.

FLORES, M. J., PÉREZ, J. J., FEBLES, V. G., DOMINGUEZ, G. C., RIAS, E. T., PÉREZ, J. A. Microscopy techniques and image analysis for evaluation of some chemical and physical properties and morphological features for seeds of the castor oil plant (*Ricinus communis*). **Industrial Crops and Products**, 34(1), 1057 – 1065, 2011.

FLORES, M. J. P.; FEBLES, V. G.; PÉREZ, J. J. C.; DOMÍNGUEZ, G. C.; MÉNDEZ, J. V. M.; GONZÁLEZ, E. P.; LÓPEZ, G. F. G. Mathematical modelling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. **Industrial Crops and Products**, v. 38, p. 64 – 71, 2012.

FUNGUETTO, C. I. Efeitos da secagem intermitente sobre a germinação de sementes de arroz (*Oriza Sativa* L.). **FZVA**, 10(1), 34 – 41, 2003.

GINER, S. A.; GELY, M. C. Sorptional Parameters of Sunflower Seeds of Use in Drying and Storage Stability Studies. **Biosystems Engineering**, v. 92, n. 2, p. 217 – 227, 2005.

GIRI, S. K.; PRASAD S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 2, p. 512–521, 2007.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; MAGALHÃES, F. E. A.; BAPTESTINI, F. M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 1, p 1 – 8, 2011.

GONELI, A. L., NASU, A. K., GANCEDO, R., ARAÚJO, W. D., & SARATH, K. L. (2014). Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (*Cordia verbenacea* DC.). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, 16(2), 434 – 443, 2014.

GOUVEIA, D. S; UGULINO, S. M. P; DUARTE, M. E. M; MATA, M. E. C. Cinética de feijão preto (*Phaseolus vulgaris*, L.) em secador de bandeja. *Holos*, v. 1, n. 27, pp. 38-48, 2011.

HASAN, A. A., & ROSHON, M. K. (2014). Thin layer drying of hybrid rice seed. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**, v. 7, n. 4, p. 169 – 175, 2014.

HASHEMI, G., MOWLA, D., & KAZEMEINI, M. (June de 2009). Moisture diffusivity and shrinkage of broad beans during bulk drying in inert medium fluidized bed dryer assisted by dielectric heating. **Journal of Food Engineering**, v. 92, n. 3, p. 331 – 338, 2009.

HERNANDEZ, F.; DISSA, A. O.; MADIOULI, J.; SAVADOGO, P. W.; SEGDA, B. G.; KOULIDIATI, J.; HERRAUD, C.; DESMORIEUX, H. Shrinkage, porosity and density behaviour during convective drying of *Spirulina*. **Journal of Food Engineering**, v. 97, n. 3, p. 410–418, 2010.

HOFSETZ, K. **Estudo do encolhimento e das transições de fase da banana nanica (*Musa acuminata* Colla – subgrupo *Cavendish*) e do abacaxi (variedade *Pérola*) utilizando etanol como acelerador de secagem**. Limeira, SP. 2013.

IRIGOYEN, R. M. T.; GINER, S. A. Drying – toasting kinetics of presoaked soybean in fluidised bed. Experimental study and mathematical modelling with analytical solutions. **Jornal of Food Engineering**, v. 128, p. 31 – 39, 2014.

IRIGOYEN, R. M. T.; GONJI, S. M.; GINER, S. A. Drying – toasting kinetics of presoaked soybean. A mathematical model considering variable diffusivity, shrinkage and coupled heat transfer. **Jornal of Food Engineering**, v. 142, p. 70 – 79, 2014.

ITAYA, Y.; T. KOBAYASHI, T.; HAYAKAWA, K., Three-dimensional heat and moisture transfer with viscoelastic strain–stress formation in composite food during drying. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 38, n. 7, p. 1173–1185, 1995.

IXTAINA, V. Y.; NOLASCO, S. M.; TOMÁS, M. C. Physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. **Industrial Crops and Products**, v. 28, n. 3, p. 286 – 293, 2008.

JANJAI, S.; LAMLERT, N.; INTAWEE, P.; MAHAYOTHEE, B.; HAEWSUNGCHARERN, M.; BALA, B. K.; MÜLLER, J. Finite element simulation of drying of mango. **Biosystems Engineering**, v. 99, n. 4, p. 523–531, 2008.

JANJAI, S.; MAHAYOTHEE, B.; LAMLERT, N.; BALA, B. K.; PRECOPPE, M.; NAGLE, M.; MÜLLER, J. Diffusivity, shrinkage and simulated drying of lichi fruit (*Litchi Chinensis* Sonn.). **Journal of Food Engineering**, v. 96, n. 2, p. 214 – 221, 2010.

JESUS, A. R.; MARQUES, N. S.; SALVI, E. J. N. R.; TUYUTY, P. L. M.; PEREIRA, S. A. Dossiê Técnico: Cultivo da Moringa Oleífera. **Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas**. Instituto Euvaldo Lodi.- IEL/BA. 2013.

KAHYAOGLU, T., & KAYA, S. Modeling of moisture, color and texture changes in sesame seeds during the conventional roasting. **Journal of Food Engineering**, 75(2), 167 - 177. 2006.

KATEKAWA, M. E., **Análise teórico - experimental do encolhimento: estudo da secagem de banana**. 2006. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Programa de Pós –

Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2006.

KATEKAWA, M. E; SILVA, M. A. A Review of drying models including shrinkage effects. **Drying Technology**. v. 24, n. 1, p. 5 – 20, 2006.

KHALLOUFI, S.; RIVERA, C. A.; BONGERS, P. A fundamental approach and its experimental validation to simulate density as a function of moisture content during drying processes. **Journal of Food Engineering**, v. 97, n.2, p. 177 – 187, 2010.

KHIR, R.; PAN, Z.; SALIM, A.; HARTSOUGH, B. R.; MOHAMED, S. Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. **LTW – Food Science and Technology**, v. 44, n. 4, p. 1126 – 1132, 2011.

KORIFI, R.; DRÉAU, Y. FRANCOIS, A. J.; DUPUY, N. CIEL*a*b* color space predictive models for colorimetry devices – Analysis of perfume quality. **Trochaalanta**, v. 105, pp. 58-66, 2013.

KOZLOWSKI, T. T., & PALLARDY, S. G. Seed Germination and Seedling Growth. In: **Growth Control in Woody plants**, pp. 14 - 72. Academic Press, 1997.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, v. 15, n. 10, p. 2441 – 2458, 1997.

KOÇ, B.; EREN, I.; ERTEKIN, F. K. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: the effect of drying method. **Journal of Food Engineering**, v. 85, n. 3, p. 340 – 349, 2008.

KUROZAWA, L. E.; HUBINGER, M. D.; PARK, K. J. Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying. **Journal of Food Engineering**, v. 108, p. 43 – 50, 2012.

KUROZAWA, L. E.; TERNG, I.; HUBLINGER, M. D.; PARK, K. J. Ascorbic acid degradation of papaya during drying: Effect of process conditions and glass transition phenomenon. **Journal of Food Engineering**, v. 123, p. 157 – 164, 2014.

LAVERDE, L. M. A.; SCHEBOR, C.; BUERA, M. P. Water content effect on the chromatic attributes of dehydrated strawberries during storage, as evaluated by image analysis. **LTW-Food Science and Technology**. v. 52, n. 2, pp. 157-162, 2013.

LOPES, F. J. **Estudo do fenômeno de encolhimento na secagem convectiva de abacaxi com aplicação de micro-ondas**. 2013. 147 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Pós – Graduação em Produção Vegetal, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil, 2013.

LÓPEZ, I. I. R.; ALVARADO, M. A. G. Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 1, p. 208–216, 2007.

MADIOULI, J.; LECOMTE, D.; NGAYANA, T.; CHAVEZ, S.; SGHAIER, J.; SAMMOUDA, H. A method for determination of porosity change from shrinkage curves of deformable materials. **Drying Technology**, v. 25, n. 4, p. 621 – 628, 2007.

MADIOULI, J.; SGHAIER, J.; LECOMTE, D.; SAMMOUDA, H. Determination of porosity change from shrinkage curves during drying of food material. **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, n. 1, p. 43 – 51, 2012.

MAY, B. K.; PERRÉ, P. The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs. **Journal of Food Engineering**. v 54, n 4, p. 271 – 282, 2002.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling Shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, v.61, p. 373-386, 2004.

MEDEIROS, U. K. L. **Estudo da secagem do feijão verde (*Vigna unguiculata* L. Walp) – Análise experimental do processo combinado leito fixo/leito de jorro.** *Dissertação*, Natal, RN. 2004.

MERCIER, S.; VILLENEUVE, S.; MONDOR, M.; MARCHAIS, L. P. Evolution of porosity, shrinkage and density of pasta fortified with pea protein concentrate during drying. **Food Science and Technology**, v. 44, n. 4, p. 883 – 890, 2011.

MIAMOTO, R., RIVAS, R., POMPELLI, M. F., & SANTOS, M. G. Avaliação do vigor de dois lotes de sementes de *Moringa oleífera* L. *IV Congresso Brasileiro de Mamona e I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas.*, 1, pp. 859 - 863. João Pessoa. 2010.

MILCZAREK, R. R; DAI, A. A.; OTONI, C. G.; MCHUGH T .H. Effect of shrinkage on isothermal drying behavior of 2-phase olive mill waste. **Journal of Food Engineering**, v. 103, n.4, p. 434–441, 2011.

MOFIJUR, M.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; ATABANI, A. E.; ARBAB, M. I, CHENG, S. F, GOUK, S. W. Properties and use of *Moringa oleífera* biodiesel and diesel fuel blends in a multi – cylinder diesel engine. **Energy Conversion an Management**, v.82, p. 169 – 176, 2014a.

MOFIJUR, M.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; ATABANI, A. E.; FATTAH, I. M. R. MOBARAK, H. M. Comparative evaluation of performance and emission characteristic of *Moringa oleífera* and Palm oil based biodiesel in a diesel engine. **Industrial Crops and Products**, v. 53, p. 78 – 84, 2014b.

MOHSENUM, N. N. Physical Characteristics. IN: **Physical properties of plant and animal materials:** structure, physical characteristics and mechanical porperties. New York. 2.ed. Chapter 3, 1986.

MONCALEANO-ESCADON, J.; SILVA, B. C. F.; SILVA, S. R. S.; GRANJA, J. A. A.; ALVES, M. C. J. L.; POMPELLI, M. F. Germination responses of *Jatropha curcas* L. seeds to storage and aging. **Industrial Crops and Products**. v. 44, pp. 648-690, 2013.

MOREIRA, R. CHENLO, F. CHAGURI, L. VÁRQUES, G. Mathematical modelling of the drying kinetics of chestnut (*Castanea Staiva* Mill.): Influence of the natural shells. **Food and Bioproducts Processing**. v 83, n 4, p. 3006 – 314, 2005.

MORETI, L. O., CAMACHO, F. P., BONGIOVANI, M. C., STROHER, A. P., NISCHI, L., VIEIRA, A. M. Use of Moringa Oleífera Lam, as an alternative coagulant to polyaluminum chloride in the treatment of drinking water. **e - xata**, v. 6, n.1, p. 153 – 165, 2013.

MOTEVALI, A., MINAEI, S., KHOSHTAGHAZA, M. H., & AMIRNEJAT, H. Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices. **Energy**, v. 36, n11, p. 6433 - 6441. 2011.

NASCIMENTO, V. R. G.; **Secagem convectiva e com radiação infravermelha de grãos de Moringa oleífera Lam**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, Brasil, 2014.

NETO, D. N.; OLIVEIRA, M. G.; SIMINONATO, E.; FACCO, J. T.; NETO, C. M.; SILVA, G. T. S. T.; CABRAL, M. R. P.; PIEREZAN, L.; SILVA, R. C. L. **Biodiesel obtido a partir de óleos de amêndoas de Mato Grosso do Sul**. 36^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. Águas de Lindóia, SP, 2013.

NIAMNUY, C.; NACHAISIN, M.; POOMSA – AD, N.; DEVAHASTIN, S. Kinetic modelling of drying and conversion/degradation of isoflavones during infrared drying of soybean. **Food Chemistry**. v. 133, n 3, p. 946 – 952, 2012.

NINDO, C., & MWITHIGA, G. Infrared Drying. In: PAN, Z.; ATUNGULU, G. G. (eds) **Infrared heating for food and agricultural processing**, Cap. 5, p. 89-97 New York: CRC Press, 2011.

NISHI, L., MADRONA, G. S., VIEIRA, A. M., BASSETI, F. J., SILVA, G. F., & BERGAMASCO, R. **Coagulação/ Floculação com sementes de Moringa oleífera Lam para**

remoção de cistos de *Giardia spp.* e Oocistos de *Cryptosporidium spp.* da água. *3rd Workshop Internacional Advances in Cleaner Production*. São Paulo, 2011.

NOWARK, D.; LEWICKI, P. P. Infrared drying of apple slices. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 5, n. 3, p. 353 – 360, 2004.

OCHOA, M. R.; KESSELER, A. G.; PIRONE, B. N.; MÁRQUES, C. A.; MICHELIS, A. Analysis of shrinkage phenomenon of whole sweet cherry fruits (*Prunus avium*) during convective dehydration with very simple models. **Journal of Food Engineering**. v 79, n 2, p. 657 – 661, 2007.

OLIVEIRA, D. S.; FONSECA, X. D. S.; FARIAS, P. N.; BEZERRA, V. S.; PINTO, C. H. C.; SOUZA, L. D.; SANTOS, A. G. D.; MATIAS, L. G. O. Obtenção do biodiesel através da transesterificação do óleo de *Moringa oleífera* Lam. . **HOLOS**, v. 28, n. 1, 2012.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**, Dissertação de Mestrado, Indiana: Purdue University, 1949.

PALOU, E.; LÓPEZ-MALO, A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; WELTI-CHANES, J.; SWANSON, B.G. Polyphenoloxidase activity and color of blanched and high hydrostatic pressure treated banana puree. **Journal of Food Science**, v.64, p.42-45, 1999.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. *Material didático instrucional – Apostila*. Campinas, SP. 2007.

PASSOS, R. M.; SANTOS, D. M. C.; SANTOS, B. S.; SOUZA, D. C. L.; SANTOS, J. A. B.; SILVA, G. F. Qualidade pós – colheita da Moringa (*Moringa olifera* Lam) utilizada na forma *in natura* e seca. **Revista Geintec**, v. 3, n. 1, p. 113 – 120, 2012.

PEREIRA, A. V. **Caracterização e secagem de sementes de painço (*Setaria itálica* L.)**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Programa de Pós – Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, Brasil, 2010.

PESSOA, T.; GALDINO, P. O.; GURJÃO, G. C.; GURJÃO, F. F.; MOTA, M. E. R. M. C. Secagem convectiva de grãos de sorgo em camada fina por secador de leito fixo. **Revista verde de agroecologia e desenvolvimento sustentável**, v. 6, n. 1, p. 247 – 255, 2011.

PINEDO, A. A.; MURR, F. E. X.; ZILDA, D. S. A.; ZUÑIGA, A. D. G. Modeling with shrinkage during the vacuum drying of carrot (*Daucus carota*). **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 34, n. 2, p. 611 – 621, 2010.

PONKHAM, K.; MEESO, N.; SOPONRONNARIT, S.; SIRIAMORNPUN, S. Modeling of combined far – infrared radiation and drying of a ring shaped – pineapple whith/ without shrinkage. **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, n. 2, p. 155 – 164, 2012.

PORTHULA, A. K.; IGATHINATHANE, I.; SHEN, J.; NICHOLS, K.; ARCHER, D. Millerd industrial beet color kinetics and total soluble solid contents by image analysis. *Industrial Crops and Products*. v. 65, pp. 159-169, 2015.

RAJANANDH, M. G.; SATISHKUMAR, M. N.; ELANGO, K.; SURESH, B. *Moringa oleifera* Lam. A herbal medicine for hyperlipidemia: a pre – clinical report. **Asian Pacific Journal of Tropical Disease**, v. 2, n. 2, p S790 – S795, 2012.

RAMOS, I. N.; SILVA, C. L. M.; SERENO, A. M.; AGUILERA, J. M. Quantification of microstructural changens during first stage air drying of grape tissue. **Journal of Food Engineering**. v. 62, pp. 159-164, 2004.

RASHID, U., ANWAR, F., MOSER, B. R.; KNOTHE, G. *Moringa oleifera* oil: A possible source of biodiesel. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 8175 – 8179, 2008.

RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, v. 23, p. 91-105, 1994.

ROSS, Y. H. Glass Transition Temperature and Its Relevance in Food Processing. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 1, p. 469 – 496, 2010.

RUFFATO, S.; CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H.; MANTOVANI, B. H. M.; SILVA, J. N. Influência do processo de secagem sobre a massa específica aparente, massa específica unitária e porosidade de milho – pipoca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 1, p. 45 – 48, 1999.

SACILIK, K. Effect of drying methods on thin – layer drying characteristics of hull – lees seed pumpkin (*Curcubita pepo* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 1, p. 23 – 30, 2007.

SANTANA, C. R.; PEREIRA, D. F.; ARAÚJO, N. A.; CAVALCANTI, E. B.; SILVA, G. F. Caracterização físico – química da Moringa (*Moringa oleífera* Lam). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 1, p 55 – 60, 2010.

SANTOS, A. R. F. **Desenvolvimento inicial de *Moringa oleífera* Lam. sob condições de estresse**. 2010. 77 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) Núcleo de Pós – Graduação e Estudos em Recursos Naturais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, Brasil, 2010.

SANTOS, I. C. F.; CARVALHO, S. H. V.; SOLLETI, J. I.; SALLES, W. F. L.; SALLES, K. T. S. L.; MENEGHETTI, S. M. P. Studies of *Terminalia catappa* L. oil: Characterization and biodiesel production. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 14, p. 6545 – 6549, 2008.

SANTOS, C. J. R. **Secagem de sementes de girassol via radiação infravermelho e convecção forçada de ar aquecido**. 2009. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Tiradentes, Aracaju – SE, Brasil, 2009.

SANTOS, M. N.; TEIXEIRA, M. L. F. Semente de amendoeira (*Terminalia catappa* L.) (Combretaceae) como substrato para o cultivo de orquídeas epífitas. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 2, p. 339 – 343, 2010.

SARATH, K. L.. **Efeito imediato e latente da temperatura do ar de secagem sobre a qualidade das sementes de amendoim**. Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, MS, 2013.

SERENO, A. M.; SILVA, M. A.; MAYOR, L. Determination of the particle density and porosity in foods and porous materials with high moisture content. **International Journal of Food Properties**, v. 10, n. 3, p. 455 – 469, 2007.

SILVA, J. P. V.; SERRA, T. M.; GOSSMANN, M.; WOLF, C. R.; MENEGHETTI, M. R.; MENEGHETTI, S. M. P. *Moringa oleífera* oil: Studies of characterization and biodiesel production. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 10, p. 1527 – 1530, 2010.

SILVA, B. G. **Modelagem e Simulação do Processo de Secagem dos Frutos de Aroeira-Vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi)**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, Brasil, 2013.

SILVA NETO, S. N.; PRADO, M. M.; MARQUES, L. G. Transferência de massa na secagem infravermelho de sementes de pinhão – manso (*Jatropha curcas* L.) *Scientia Plena*. v. 10, n. 3, 2014.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Determination of the volumetric shrinkage in jatropha seeds during drying. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 34, n. 3, p. 231 – 238, 2012.

SLEDZ, M., IKTR, A., RYBAK, K., NOWACKA, M., & RAJCHERT, D. W. The impact of ultrasound and blanching pre - treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves. **Applied Acoustics**, 2015.

SOPADE, P. A.; LEE, S. B.; WHILE, E. T.; HALLEY, P. J. Glass transition phenomena in molasses. **LTW – Food Science and Technology**, v. 40, n. 6, p. 1117 – 1122, 2007.

STURM, B.; VEJA, A. M. N.; HOFACKER, W. C. Influence of process control strategies on drying kinetics, color and shrinkage of air dried apples. **Applied Thermal Engineering**, v. 62, n. 2, p. 455 – 460, 2014.

SUZUKI, K.; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T.; HOSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root vegetables. **Journal of Food Science**, v. 41, p. 1189 – 1193, 1976.

TASIRIN, S. M., PUSPASARI, I., LUN, A. W., CHAI, P. V., & LEE, W. T. Drying of kaffir lime leaves in fluidized bed dryer with inert particles: Kinetics and quality determination. **Industrial crops and Products**, 61, 193 – 201, 2014.

THUWAPANICHAYANAN, R.; PRACHAYAWARAKORN, S.; KUNWISAWA, J.; SOPONRONNARIT, S. Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. **LWT – Food Science and Technology**, v. 44, n. 6, p. 1502–1510, 2011.

TOGRUL, H. Suitable drying model for infrared frying of carrot. **Journal of Food Engineering**, v. 77, n. 3, p. 610 – 619, 2006.

VÉRAS, A. O. M. **Secagem de pimento dedo-de-moça (*Capsicum baccatum* var. *pendulum*) em secador convectivo horizontal**. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Programa de Pós – Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, Brasil, 2010.

VIEIRA, M. G. A., **Análise da secagem de polpa de celulose para a obtenção de papel reciclado tipo cartão**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 232 p., 2006.

XU, C.; LI, Y.; YU, H. Effect of far – infrared drying on the water state and glass transition temperature in carrots. **Journal of Food Engineering**, v. 136, p. 42 – 47, 2014.

YAN, Z.; SOUSA-GALLAGHER, M. J.; OLIVEIRA, F. A. R. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. **Journal of Food Engineering**, v. 84, p. 430-440, 2008.

YALÇIN, I.; OZARSLAN, C.; AKBAS, T. Physical properties of pea (*Pisum sativum*) seed. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 2, p. 731 – 735, 2007.

ZIELINSKA, M. MARKOWSKI, M. Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 49, n. 2, p. 212–218, 2010.