

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

**PROPRIEDADES FÍSICAS DE SEMENTES DE FEIJÃO-
CAUPI DURANTE A SECAGEM**

LIDIANE DAUZACKER GOMES

DOURADOS - MS

2016

PROPRIEDADES FÍSICAS DE SEMENTES DE FEIJÃO- CAUPI DURANTE A SECAGEM

LIDIANE DAUZACKER GOMES

Engenheira Agrícola

Orientador: PROF. DR. ANDRÉ LUIS DUARTE GONELI

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Universidade Federal da
Grande Dourados, como parte das
exigências para conclusão do curso de
Engenharia Agrícola.

DOURADOS - MS

2016

PROPRIEDADES FÍSICAS DE SEMENTES DE FEIJÃO- CAUPI DURANTE A SECAGEM

Por

Lidiane Dauzacker Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para
obtenção do título de Engenheiro Agrícola.

Aprovado em: __/__/____

Prof. Dr. André Luis Duarte Goneli– UFGD
Orientador – UFGD/FCA

Prof. MSc. Elton Aparecido Siqueira Martins – UFGD
Membro da Banca – UFGD/FCA

Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira– UFGD
Membro da Banca – UFGD/FCA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois se não fosse pela vontade dele eu não estaria aqui, foi ele quem me deu saúde, sabedoria e disposição para concluir este sonho em minha vida.

Ao meu pai, Nelson Gomes, por ter me apoiado desde o início desta trajetória não medindo esforços para alcançar esta vitória, me dando força e depositando toda confiança em mim, acreditando sempre na minha capacidade.

A todos meus professores, pelo conhecimento transmitido e atenção que me deram desde o do início do curso. Em especial ao professor e orientador desta pesquisa, André Luis Duarte Goneli, com quem trabalhei desde o início da graduação, foi com ele que obtive grande parte do conhecimento interdisciplinar, principalmente com os projetos desenvolvidos em grupo, como no grupo de pesquisa Engenharia de Pós-Colheita de Produtos Agrícolas.

Ao Guilherme Cardoso Oba, pelo auxílio e paciência em diversos momentos durante a execução desta pesquisa.

A banca examinadora, composta pelos professores Elton Aparecido Siqueira Martins e Valdiney Cambuy Siqueira, no auxílio e observações levantadas nesta pesquisa, transmitindo suas experiências e conhecimentos.

A todos meus amigos pelo apoio, confiança e força que me deram desde o início, principalmente pela paciência a cada final de semestre. Estes foram fundamentais para cessar parte das dificuldades além da faculdade, a saudade e presença da família.

Obrigada!

SUMÁRIO

	PÁGINA
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	6
3.1. Massa Específica Aparente e Massa Específica Real ou Unitária.....	7
3.2. Porosidade da Massa.....	8
3.3. Massa de Mil Sementes	8
3.4. Dimensões e Volume Unitário.....	9
3.5. Forma e Tamanho	9
3.5.1. Circularidade e Esfericidade	10
3.5.2. Área Projetada e Superficial	10
3.6. Índice de Contração Volumétrica da Massa e Unitária	11
3.7. Procedimento Estatístico.....	12
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
4.1. Massa Específica Aparente e Massa Específica Real ou Unitária.....	14
4.2. Porosidade da Massa.....	17
4.3. Massa de Mil Sementes	19
4.4. Forma e Tamanho	20
4.6. Índice de Contração Volumétrica da Massa e Unitária	25
5. CONCLUSÃO.....	29
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

GOMES, Lidiane Dauzacker. **Propriedades Físicas de Sementes de Feijão Caupi Durante a Secagem**. 2016. 34f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS.

RESUMO

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Pré-Processamento de Produtos Agrícolas, pertencente à Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados, no município de Dourados, MS, a cultura foi cultivada na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA) da UFGD, colhidas e debulhadas manualmente. Considerando a importância do processo de secagem e a ausência de informações referentes ao comportamento das sementes de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) durante a secagem, objetivou-se analisar as propriedades físicas desse produto em diferentes teores de água. O feijão-caupi é cultivado para a produção de grãos, secos e verdes, visando o consumo humano, é uma cultura de grande potencial energético e fácil manejo. O processo de secagem visa à manutenção da qualidade na conservação de alimentos por longos períodos de tempo, as informações obtidas referentes à variação das propriedades físicas dos produtos agrícolas em função da variação do teor de água são essenciais para o dimensionamento das operações envolvidas nesse processo. Os testes realizados para a determinação das propriedades físicas do feijão-caupi foram: massa específica aparente, massa específica unitária, porosidade da massa, massa de mil sementes, dimensões e volume unitário, forma e tamanho, índice de contração volumétrica da massa e unitária, por fim, realizou-se o procedimento estatístico para análise dos resultados das propriedades físicas de acordo com os dados experimentais. Pode-se concluir que todas as propriedades físicas das sementes de feijão-caupi sofreram alterações conforme redução do teor de água, dentro da faixa de umidade avaliada, acarretando no aumento dos valores de massa específica aparente, esfericidade, relação superfície volume e redução dos demais valores.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata*, massa específica aparente, forma, contração volumétrica.

1. INTRODUÇÃO

Segundo dados da Embrapa Meio Norte (2003), o feijão-caupi, feijão-de-corda ou feijão-macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) é uma excelente fonte de proteínas (23-25% em média) e carboidratos (62%, em média), além de aminoácidos essenciais, vitaminas, minerais, fibras dietéticas e baixa quantidade de gordura (teor de óleo de 2%, em média) além de não conter colesterol.

Pelo seu valor nutritivo, o feijão-caupi é cultivado principalmente para a produção de grãos, secos ou verdes, visando o consumo humano in natura, na forma de conserva ou desidratado. Porém, as tecnologias atuais para sua produção são voltadas para áreas quentes, tornando necessário o estudo para adaptar as variedades a outras regiões, como o Centro-Oeste.

Atualmente os produtos têm sido retirados com teor de água elevado do campo, por conta de uma série de fatores, como: desocupação do campo mais cedo para a implantação de uma nova safra, menor exposição do produto ao ataque de pragas e doenças e para obtenção de produtos com melhor qualidade, escolha para melhor época de comercialização, entre outros fatores.

Esses produtos são encaminhados para os processos de secagem e armazenagem que tem por objetivo manter sua qualidade e aumentar a vida útil através de processos que envolvem simultaneamente a transferência de calor e massa. Cada produto tem suas características particulares e o conhecimento delas é fundamental para o dimensionamento, operação do processo e minimização dos custos na pós-colheita de produtos agrícolas.

Araujo et al. (2015) ressaltam que o conhecimento das propriedades físicas de cada produto é de extrema importância na engenharia para elaboração de máquinas, estruturas, análise e determinada eficiência de um equipamento ou operação e a avaliação da qualidade do produto final.

Dentre tantas características físicas dos produtos agrícolas, o tamanho, volume, porosidade, massa específica são consideradas de grande importância (GONELI et al., 2008). Sendo, o volume dos produtos agrícolas normalmente, a que mais sofre variação durante a secagem.

A massa específica aparente pode ser descrita como a massa que determinado volume de sementes ou grãos, incluindo os espaços vazios. A massa

específica unitária é a massa por unidade de volume das sementes, desconsiderando-se os espaços intergranulares. As informações fornecidas por estas propriedades físicas são capazes de auxiliar no dimensionamento de silos, cálculo de transportadores, separadores e classificadores de grãos e sementes.

A redução do teor de água nos grãos ou sementes influencia diretamente a forma geométrica e o tamanho dos produtos, pois, causam danos em sua estrutura celular, e essas características determinam o tamanho e a forma dos furos das peneiras, além de interferir na redução do seu volume externo.

Considerando a importância do processo de secagem e a ausência de informações referente ao comportamento das propriedades físicas das sementes de feijão-caupi, objetivou-se com o presente trabalho caracterizar a variação das propriedades físicas das sementes de feijão-caupi em função da variação do seu teor de água.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Os grãos de leguminosas são importantes fontes de proteínas e calorias na alimentação humana, além de possuir quantidades razoáveis de cálcio e ferro (SILVA et al., 2002). De acordo com Resende et al. (2010), o feijão assume enorme importância na alimentação humana, principalmente, devido ao seu baixo custo, riqueza de proteínas e seu cultivo estar disseminado em todo país.

Freire-Filho (2011) afirma que o feijão-caupi é uma cultura de grande potencial estratégico e de fácil manejo, por isso, é cultivado em uma vasta gama de sistemas de produção, desde os cultivos solteiros até os cultivos consorciados.

No Brasil, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2016), para a safra 15/16, as maiores produções de feijão-caupi foram nas Regiões Norte/Nordeste, produzindo acerca de 152,9 mil toneladas de grãos em uma área de, aproximadamente, 408,5 mil hectares. A Região Nordeste foi responsável por quase 97% da produção total de grãos de feijão-caupi, com uma média de produtividade de 372 kg ha⁻¹, em comparação aos 1362 kg ha⁻¹ obtidos nas Regiões Centro-Sul. A Região Centro-Oeste foi responsável por 2,8% da produção nacional de feijão-caupi na safra 15/16, sendo do Estado de Goiás, uma grande fatia dessa produção.

Devido à importância dessa cultura, nas últimas décadas, diversas pesquisas estão sendo voltadas ao seu melhoramento genético, visando à seleção e obtenção de cultivares que melhor se adaptem às diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. Contudo, Silva et al. (2002) afirmaram que, fatores como a manipulação genética, tratamentos culturais, manejo pós-colheita, métodos de processamento e tempo pós-colheita dos grãos podem alterar a proporção relativa dos constituintes químicos no produto.

A qualidade final de um lote de sementes é resultado de uma série de fatores envolvidos na condução a campo, durante a colheita e na pós-colheita, sendo que o potencial de armazenamento do mesmo está intimamente relacionado à sua qualidade inicial (CARVALHO e NAKAGAWA, 2012).

Desse modo, em um sistema agrícola onde a busca pela excelência se torna cada vez mais exigida, dentre outras vantagens, a colheita antecipada permitiria a minimização das perdas ocorridas no campo, em decorrência do ataque de insetos e microorganismos (RIBEIRO et al., 2005; ARAUJO et al., 2014).

As sementes quando armazenadas com elevados teores de água, tendem a apresentar perda de qualidade, seja fisiológica, física, química ou bioquímica, mais acentuada que quando armazenadas com grau de umidade seguro (ALI et al., 2014).

Neste sentido, o processo de secagem visa à conservação de alimentos pela preservação contra deterioração, conservação de suas propriedades, das condições durante o armazenamento, diminuição de custos com transporte, entre outros, é uma das operações unitárias mais antigas que se tem conhecimento (RAMOS, 2003).

O princípio físico envolvido no processo de secagem é a remoção de água do grão por evaporação, onde ocorre por transferência de calor e massa. É necessário o fornecimento de calor para evaporar a água do produto e um meio de transporte para remover o vapor de água formado na superfície do produto a ser seco. Existem vários meios de se realizar esta remoção, sendo por ar quente um dos mais utilizados. Segundo Resende et al. (2008a) dependendo do método e condição de secagem empregada, a qualidade e propriedades físicas do produto podem sofrer alterações.

As informações obtidas com a determinação das propriedades físicas de produtos agrícolas, durante a secagem, servem de base para engenheiros e projetistas de equipamentos para operações de colheita, manuseio, classificação, transporte, beneficiamento, secagem, armazenamento, processos de controle, bem como para a otimização de processos industriais, além, de auxiliarem na tomada de decisões nos processos pós-colheita (SIQUEIRA et al., 2012a; ARAUJO et al., 2014 e 2015).

Em adição, Goneli et al. (2008) e Araujo et al. (2014) afirmaram que a caracterização completa do comportamento das propriedades físicas desses produtos agrícolas durante a secagem é uma importante ferramenta para a minimização dos custos de produção, desse modo, tornando agricultura cada vez mais competitiva e sustentável.

A partir de dados referentes às variações das dimensões de produtos agrícolas, em função do seu teor de água, projetistas podem aperfeiçoar sistemas de secagem, considerando a movimentação do produto no secador, direção do fluxo de ar, dentre outros parâmetros e processos (ARAUJO et al., 2015).

Araujo et al. (2014) afirmam que o volume é normalmente a característica física que mais sofre variação durante o processo de secagem, interferindo na redução do tamanho ou até na forma geométrica dos produtos, características essas, essenciais para determinar o tamanho e forma dos furos das peneiras utilizadas nas etapas de pós colheita. Além disso, ressaltam que os valores de massa específica aparente e massa

específica unitária podem auxiliar no dimensionamento de silos, transportadores e elevadores.

Para o projeto, modernização, melhoria e estudos de viabilidade comercial de sistemas para secagem de sementes e grãos, a simulação e a obtenção de informações teóricas relativas ao comportamento desses produtos agrícolas durante a secagem são essenciais (MENEGHETTI et al., 2012 e RESENDE et al., 2010).

Para Gely e Giner (2007) essas informações auxiliam nas tomadas de decisões, buscando a máxima eficiência do processo e, principalmente, sem afetar a qualidade do produto a ser secado. Conforme Afonso Júnior e Corrêa (1999), as simulações baseiam-se na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utilizando-se um modelo matemático que possa descrever com fidelidade a perda de água do material durante a secagem.

A equação obtida para a cinética de dessecção em camada delgada, associada com equações de outras propriedades físicas do produto em questão, fornece um conjunto de relações matemáticas que contribuem para o cálculo e entendimento do processo de secagem em camada espessa (GONELI et al., 2009).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Pré-Processamento de Produtos Agrícolas, pertencente à Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados, no município de Dourados, MS.

O material estudado foram sementes de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) cultivar BRS Guariba, produzidas na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA) da UFGD.

Após a colheita, realizou-se o procedimento de debulha manual das sementes, essas foram depositadas em três embalagens de polipropileno de baixa densidade e armazenadas em câmara do tipo B.O.D. (*Biochemical Oxygen Demand*), regulada a 3,5 °C, durante três dias. Este processo visou minimizar a perda de água pela massa do material na forma de vapor, homogeneizar seu teor de água e reduzir o metabolismo do produto e de micro-organismos presentes nas sementes até o momento da secagem.

Para preparação das amostras do produto, realizou-se a homogeneização e determinação do teor de água (BRASIL, 2009). Após estes procedimentos, o produto foi submetido à secagem em estufa com ventilação forçada, regulada a temperatura de 40 °C para que a remoção de água fosse lenta, permitindo assim um bom espaçamento de tempo para realizar as determinações das propriedades físicas do produto para diferentes teores de água.

Após determinação do teor de água inicial o acompanhamento da redução do teor de água do produto ao longo da secagem foi realizado pelo método gravimétrico, até atingir teor de água final.

$$\text{Teor de água inicial} = 0,47 \pm 0,01 \text{ decimal b. s.}$$

$$\text{Teor de água final} = 0,11 \pm 0,01 \text{ decimal b. s.}$$

Foi utilizada balança semi-analítica com resolução de 0,01 g para a determinação da massa específica aparente e contração volumétrica da massa. Já para as demais propriedades físicas, utilizou-se uma balança semi-analítica com resolução de 0,001 g.

A seguir são apresentados os testes para a determinação das propriedades físicas das sementes de feijão-caupi, em cada teor de água durante a secagem.

3.1. Massa Específica Aparente e Massa Específica Real ou Unitária

Para determinação da massa específica aparente (ρ_{ap}) das sementes de feijão-caupi utilizou-se uma balança de peso hectolítrico com recipiente cilíndrico de volume de 1,0 L. Foram realizadas 5 medições nas quais as sementes foram acondicionadas no recipiente cilíndrico e, em seguida, fez-se a leitura da massa da amostra em balança semi-analítica com precisão de 0,01 g.

Para a determinação da massa específica real ou unitária (ρ_u), 20 sementes de feijão-caupi foram selecionadas aleatoriamente e secas individualmente. Com o auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm foi determinado, em cada teor de água obtido durante a secagem, as medidas dos eixos perpendiculares do produto, sendo: comprimento (a), largura (b) e espessura (c), conforme ilustrado na Figura 1.

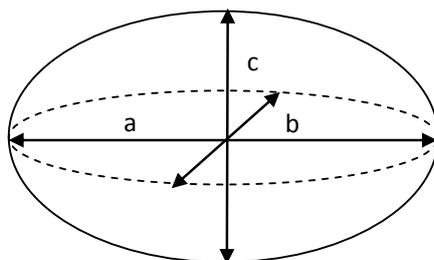


FIGURA 1. Representação dos eixos perpendiculares das sementes de feijão-caupi.

Sendo:

a: comprimento ou maior eixo, mm;

b: largura ou eixo médio, mm;

c: espessura ou menor eixo, mm.

Com as dimensões dos eixos perpendiculares, determinou-se o volume de cada semente de feijão-caupi, utilizando-se a Equação 1, proposta por Mohsenin (1986), considerando a forma do produto como esferóide triaxial ou escaleno (Figura 1).

$$V_g = \frac{\pi (a b c)}{6} \quad (1)$$

Sendo:

V_g : volume do grão, mm^3 .

Escolheu-se a Equação 1 com base em testes preliminares realizados com tolueno, onde o volume real do produto foi comparado ao volume calculado por diferentes equações para estimar o volume do grão, em que a Equação 1 foi a que mais se aproximou dos valores reais.

Com o valor do volume unitário e da massa unitária das sementes, calculou-se a massa específica unitária por meio da Equação 2.

$$\rho_u = \frac{m_g}{V_g} 10^6 \quad (2)$$

Sendo:

ρ_u : massa específica real ou unitária, kg m^{-3} ;

m_g : massa unitária, gramas.

3.2. Porosidade da Massa

A porosidade da massa de sementes de feijão-caupi foi determinada por meio da Equação 3 (MOHSENIN, 1986), de maneira indireta. Para este cálculo, foram utilizados dados experimentais da massa específica aparente e dados da massa específica real estimada pelo modelo de regressão.

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_u} \right) 100 \quad (3)$$

Sendo:

ε : porosidade intergranular, %;

ρ_{ap} : massa específica aparente, kg m^{-3} ;

ρ_u : massa específica real ou unitária, kg m^{-3} .

3.3. Massa de Mil Sementes

Para cada teor de água obtido, realizou-se a escolha aleatória de 100 sementes de feijão-caupi, em oito repetições. A massa de mil sementes foi obtida pela multiplicação da massa média das oito repetições por 10 e os resultados foram expressos em gramas (BRASIL, 2009).

3.4. Dimensões e Volume Unitário

Foram avaliadas as variações das dimensões características (a, b e c) do produto durante a secagem, em 20 sementes de feijão-caupi, descrito no item 3.1., sendo também determinados os índices de contração dos eixos perpendiculares do produto (ψ_a , ψ_b e ψ_c), conforme as Equações 4, 5 e 6.

$$\psi_a = \frac{a}{a_0} \quad (4)$$

$$\psi_b = \frac{b}{b_0} \quad (5)$$

$$\psi_c = \frac{c}{c_0} \quad (6)$$

Sendo:

a: comprimento do maior eixo em determinado teor de água, mm;

a_0 : comprimento inicial do maior eixo, mm;

b: comprimento do eixo médio em determinado teor de água, mm;

b_0 : comprimento inicial do eixo médio, mm;

c: comprimento do menor eixo em determinado teor de água, mm;

c_0 : comprimento inicial do menor eixo, mm.

O diâmetro geométrico do produto (D_g), em mm, foi obtido conforme a equação proposta por Mohsenin (1986).

$$D_g = \sqrt[3]{a b c} \quad (7)$$

O volume unitário das sementes (V_g), em mm^3 , foi determinado conforme descrito no item 3.1., pela Equação 1, proposta por Mohsenin (1986).

3.5. Forma e Tamanho

Fez-se a medição dos diâmetros perpendiculares de 20 sementes de feijão-caupi para obtenção da forma e tamanho, conforme descrito na determinação do volume para calcular a massa específica real (item 3.1).

3.5.1. Circularidade e Esfericidade

A circularidade (C) e a esfericidade (E_s), ambas expressas em porcentagens, foram determinadas por meio das Equações 8 e 9, respectivamente (Mohsenin, 1986).

$$C = \left(\frac{b}{a}\right) 100 \quad (8)$$

$$E_s = \left[\frac{(a b c)^{1/3}}{a} \right] 100 \quad (9)$$

3.5.2. Área Projetada e Superficial

A área projetada (A_p), em mm^2 , do produto foi determinada pela Equação 10.

$$A_p = \frac{\pi a b}{4} 100 \quad (10)$$

A área superficial (S), em mm^2 , das sementes de feijão-caupi foi calculada pela analogia a uma esfera de mesmo diâmetro geométrico médio, utilizando-se a Equação 11, proposta por Tunde-Akintunde e Akintunde (2004).

$$S = \pi D_g^2 \quad (11)$$

Outro método empregado para o cálculo da área superficial das sementes de feijão-caupi foi a equação proposta por Mohsenin (1986), realizando-se ajustes nas dimensões características do produto pelas seguintes expressões:

$$S = \frac{\pi D_g^2}{2} + \frac{\pi a D_g}{2 e} \text{sen}^{-1}e \quad (12)$$

Onde:

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{D_g}{a}\right)^2} \quad (13)$$

A relação superfície volume (SV), em mm^{-1} , das sementes de feijão-caupi foi determinada pela Equação 14, utilizando-se os valores da área superficial calculada pela Equação 12, proposta por Mohsenin (1986).

$$SV = \frac{S}{V_g} \quad (14)$$

A Equação 15 (MOHSENIN, 1986) apresenta a relação superfície massa (SW), em mm^2 , das sementes de feijão-caupi. Para esse cálculo, utilizaram-se dados da área superficial obtida pelo método proposto por Mohsenin (1986).

$$S_W = \zeta W^d \quad (15)$$

Sendo:

ζ e d : constantes da relação, adimensionais;

W : massa do produto, g.

3.6. Índice de Contração Volumétrica da Massa e Unitária

A relação entre o volume do produto em cada teor água obtido e o seu volume inicial (Equação 16) resulta nos índices de contração volumétrica, da massa e unitária, das sementes de feijão-caupi ao longo de sua secagem.

$$\psi = \frac{V}{V_0} \quad (16)$$

Sendo:

ψ : índice de contração volumétrica (da massa ou unitária), adimensional;

V : volume (da massa ou unitário) em cada teor de água, cm^3 ou mm^3 ;

V_0 : volume inicial (da massa ou unitário), cm^3 ou mm^3 .

Acompanhou-se a redução do volume da massa do produto ao longo da secagem com base em um volume inicial de 1000 cm^3 (1000 mL) de sementes de feijão-caupi, sendo verificada em uma proveta graduada até 1000 mL . Para cada teor de água obtido, obteve-se o volume do produto, em mL , em três determinações, sendo utilizada para o cálculo do índice de contração da massa, a média das três repetições.

Realizou-se a medição dos eixos perpendiculares de cada semente, em 20 sementes de feijão-caupi, conforme descrito para a determinação da massa específica real, a fim de acompanhar a redução do volume unitário conforme o Item 3.1.

Os modelos matemáticos apresentados na tabela 1 foram ajustados aos dados experimentais do índice de contração volumétrica da massa e unitária.

TABELA 1. Modelos matemáticos empregados para a representação do índice de contração volumétrica da massa e unitária das sementes de feijão-caupi em função do teor de água do produto

Designação do modelo	Modelo	
Bala e Woods (1984), modificado	$\psi = 1 - a \left\{ 1 - \exp \left[-b (U_0 - U) \right] \right\}$	(17)
Corrêa et al. (2004)	$\psi = 1 / [a + b \cdot \exp(U)]$	(18)
Exponencial	$\psi = a \cdot \exp(b \cdot U)$	(19)
Linear	$\psi = a + b \cdot U$	(20)
Polinomial	$\psi = a + b \cdot U + c \cdot U^2$	(21)
Rahman (1995)	$\psi = 1 + \beta(U - U_0)$	(22)

Sendo:

ψ : índice de contração volumétrica, adimensional;

U: teor de água do produto, decimal b.s.;

U_0 : teor de água inicial do produto, decimal b.s.;

a, b, c: parâmetros que dependem do produto, decimal;

β : coeficiente de contração volumétrica, decimal.

3.7. Procedimento Estatístico

Fez-se a análise de regressão polinomial de primeiro e segundo grau dos dados experimentais da massa específica aparente e real, porosidade, massa de mil sementes, área projetada, área superficial e relação superfície volume das sementes de feijão-caupi. Foi utilizado o programa computacional SigmaPlot 11.0 para ajustar os modelos de regressão, selecionando o modelo de acordo com o nível de significância pelo teste F, valores do coeficiente de determinação (R^2 , em decimal) e o conhecimento do fenômeno em estudo.

Submeteram-se os dados experimentais à análise de regressão linear e não linear para a avaliação do índice de contração volumétrica da massa e unitária, pelo método Gauss-Newton. Os modelos foram ajustados aos dados experimentais pelo programa computacional Statistica 8.0. A seleção do modelo matemático foi baseada nas magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo (P, em %) e do desvio padrão da estimativa (SE, em decimal).

As equações 23 e 24 apresentam, respectivamente, as fórmulas para os cálculos do erro médio relativo e do desvio padrão da estimativa.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (23)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (24)$$

Sendo:

n: número de observações experimentais;

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo;

GLR: graus de liberdade do modelo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Massa Específica Aparente e Massa Específica Real ou Unitária

Os valores médios observados e estimados da massa específica aparente das sementes de feijão-caupi nos diferentes teores de água estão representados na Figura 2.

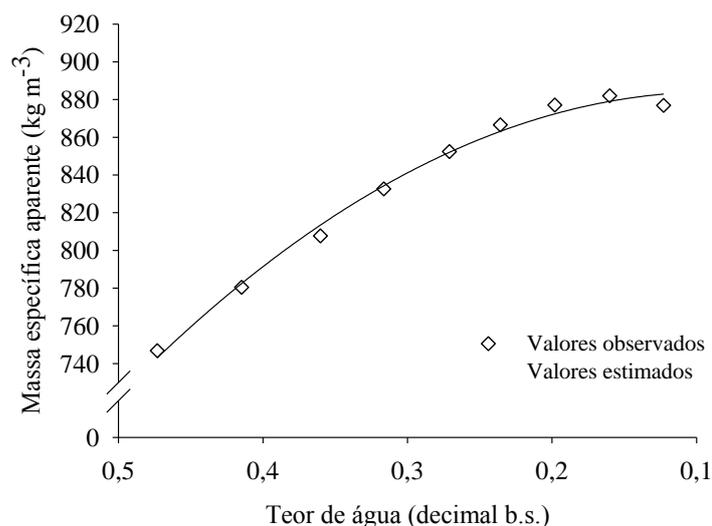


FIGURA 2. Valores observados e estimados da massa específica aparente das sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água.

Na Figura 2 pode-se observar que, conforme a redução do teor de água do produto ao longo da secagem houve aumento nos valores da massa específica aparente das sementes de feijão-caupi. Em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,12 decimal, b.s., os valores médios estimados variaram de 743,0 a 882,9 kg m⁻³, respectivamente, sendo satisfatoriamente representados por um modelo de regressão polinomial de segundo grau, apresentando elevado valor de coeficiente de determinação (0,99) e nível de significância superior a 99% (Tabela 2). Isso indica que a perda de água na forma de vapor para o ar de secagem foi menos intensa que a redução do volume da massa do produto, sendo esse fenômeno pouco evidente ao final da secagem.

TABELA 2. Equações ajustadas aos dados experimentais das propriedades físicas das sementes de feijão-caupi, com seus respectivos valores de coeficiente de determinação (R^2), F calculado (F) e nível de significância (Plevel).

Propriedades físicas	Modelo	R^2 (decimal)	F	P _{level}
Massa específica aparente	$\rho_{ap} = 877,0458 + 163,6152U - 944,3636U^2$	0,9905	415,8532	<0,0001
Massa específica unitária	$\rho_u = 1095,6696 + 816,5899U - 873,2685U^2$	0,9439	51,5063	<0,0014
Porosidade	$\epsilon = 19,2078 + 47,8945U$	0,9951	1622,7591	<0,0001
Massa de mil sementes	$M_{1000} = 180,1714 + 181,5411U$	0,9950	1198,9188	<0,0001

U: teor de água (decimal b.s.).

Esse comportamento para a massa específica aparente, representado na Figura 2, condiz com o verificado por Davies e Zibokere (2011), porém, a avaliação foi realizada a partir do re-umedecimento do feijão-caupi e encontraram para a massa específica aparente, valores que variaram, em média, de 726,9 a 622,1 kg m⁻³, inferiores aos do presente estudo. Essa diferença pode estar relacionada ao tamanho das sementes (DAVIES e ZIBOKERE, 2011) e diferenças na composição química de genótipos de mesma espécie.

No entanto, está de acordo também com o verificado para o feijão-comum (RESENDE et al., 2005; RESENDE et al., 2008b) e grãos de soja (RIBEIRO et al., 2005).

Os valores observados e estimados da massa específica real ou unitária das sementes de feijão-caupi nos diferentes teores de água obtidos durante a secagem encontram-se na Figura 3.

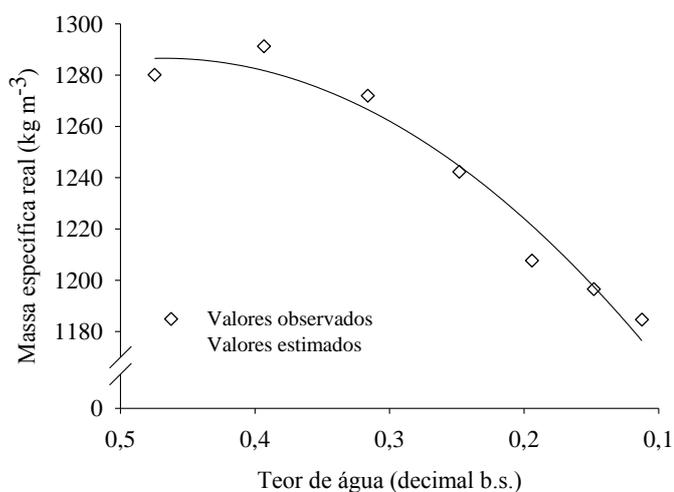


FIGURA 3. Valores observados e estimados da massa específica unitária das sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água.

A redução do teor de água foi proporcional à redução dos valores da massa específica unitária do produto (Figura 3), em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s. Os valores médios estimados da massa específica unitária das sementes de feijão-caupi variaram de 1286,5 a 1176,4 kg m⁻³, respectivamente, sendo satisfatoriamente representados por um modelo de regressão polinomial de segundo grau, apresentando elevado valor de coeficiente de determinação (0,94) e nível de significância superior a 99% (Tabela 2).

Comportamento semelhante aos frutos de mamona (GONELI et al., 2008) e grãos e frutos de amendoim (ARAUJO et al. 2014 e 2015). Porém, esses resultados são contrários aos verificados para grãos de feijão-comum (RESENDE et al., 2008b) e grãos de soja (RIBEIRO et al., 2005).

Os resultados indicaram que o comportamento da massa específica real foi contrário ao comportamento da massa específica aparente, pois, a redução do volume do produto ao longo da secagem foi menos intensa que a da massa individual, resultando na redução da massa específica unitária (Figura 3). Esse resultado pode estar relacionado com a formação de espaços vazios no interior das sementes, conforme a redução do seu teor de água (Figura 4).

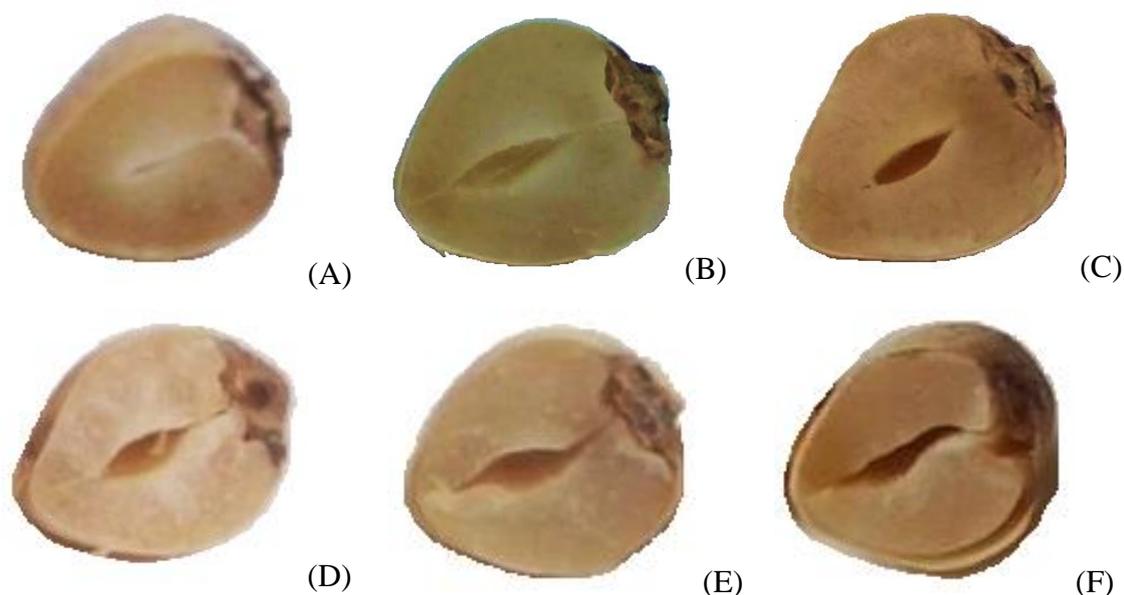


FIGURA 4. Corte transversal em sementes de feijão-caupi com teores de água de 0,40 (A); 0,33 (B); 0,26 (C); 0,20 (D); 0,14 (E); e 0,09 (F) decimal b.s..

À medida que se reduziu o teor de água do produto, houve o desprendimento de seus cotilédones, juntamente com a redução da espessura dos cotilédones na região central de contato, ou seja, acarretando na formação de espaços vazios no interior das sementes (Figuras 4A, 4B, 4C, 4D, 4E e 4F).

Considerando-se que a massa específica unitária é uma relação entre a massa e o volume unitário das sementes (Equação 2), assume-se a possibilidade de que esse fenômeno tenha influenciado negativamente no encolhimento de suas dimensões externas durante o processo de secagem, principalmente a espessura. Com isso, o produto teve a capacidade de redução de volume prejudicada, mas a perda de massa na forma de vapor de água para ar de secagem ocorreu normalmente, provendo a redução de sua massa específica real.

Pesquisadores como Goneli et al. (2008), Siqueira et al. (2012b e 2012c), Araujo et al. (2014) afirmam que a formação de espaços vazios no interior de sementes, a rigidez do tegumento e a presença de grãos no interior de frutos têm sido as principais causas da redução da massa específica aparente e unitária apresentada por alguns produtos agrícolas durante a secagem.

No trabalho realizado por Davies e Zibokere (2011) o comportamento foi ao contrário do presente estudo, relatando nos menores teores de água maiores valores de massa específica unitária dos produtos. O fenômeno histerese pode explicar o fato, pois, no processo de secagem, o encolhimento dos poros capilares não ocorre na mesma proporção que é expandido durante seu re-umedecimento (SIQUEIRA et al., 2012b).

4.2. Porosidade da Massa

A variação dos valores observados e estimados da porcentagem de porosidade intergranular da massa de sementes de feijão-caupi em função dos diferentes teores de água está representada na Figura 5.

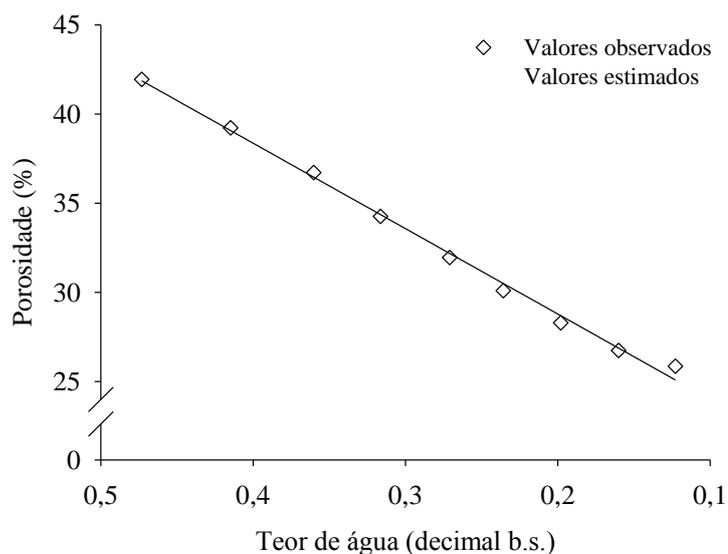


FIGURA 5. Valores observados e estimados da porcentagem de porosidade intergranular da massa de sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água.

Conforme pode ser observado na Figura 5, à medida que se reduziu o teor de água do produto também se reduziu os valores da porcentagem de porosidade intergranular. Em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,12 decimal b.s., os valores médios estimados variaram, aproximadamente, de 41,9 a 25,1%, sendo satisfatoriamente representados por um modelo de regressão linear, apresentando elevado valor de coeficiente de determinação (0,99) e nível de significância superior a 99% (Tabela 2).

A porosidade da massa de sementes de feijão-caupi foi determinada indiretamente, levando-se em consideração a relação entre a massa específica real e a massa específica aparente do produto (Equação 3). Desse modo, supõe-se que, apesar da massa específica real do produto ter decrescido conforme a redução do seu teor de água (Figura 3), quando em conjunto, as sementes tenderam a se rearranjarem, reduzindo os espaços vazios e, conseqüentemente, promovendo o aumento da massa específica aparente (Figura 2).

A porosidade intergranular (Figura 5) assimila-se aos verificados por Davies e Zibokere (2011) com feijão-caupi, Resende et al. (2005) com feijão-comum, Goneli et al., (2008) com mamona, pinhão manso (SIQUEIRA et al., 2012b) e frutos de amendoim (ARAUJO et al., 2015).

Araujo et al. (2014) encontrou comportamento contrário para a porosidade intergranular da massa dos grãos de amendoim, apresentando maiores porcentagens de espaços vazios nos menores teores de água dos materiais.

4.3. Massa de Mil Sementes

Os valores observados e estimados da massa de mil sementes de feijão-caupi obtidos nos diferentes teores de água durante a secagem estão expressos na Figura 6.

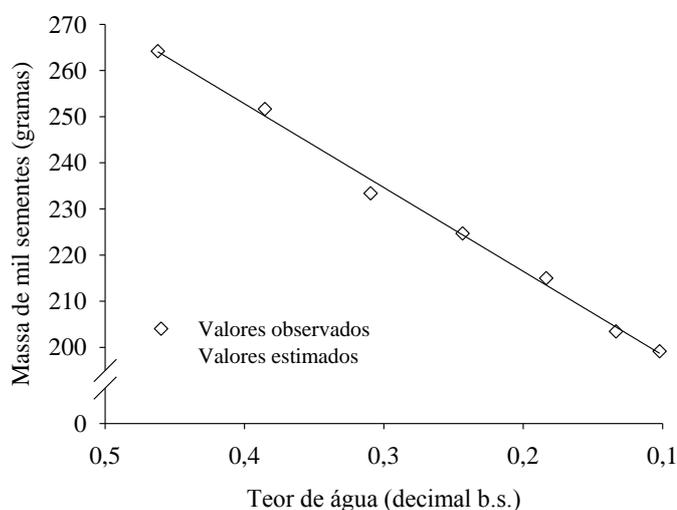


FIGURA 6. Valores observados e estimados da massa de mil sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água.

Conforme a redução do teor de água do produto a massa das mil sementes de feijão-caupi decresceu. Para faixa de teor de água de 0,46 a 0,10 decimal b.s., os valores médios estimados da massa de mil sementes variaram de 264,1 a 198,7 g, sendo satisfatoriamente representados por um modelo de regressão linear, apresentando elevado valor de coeficiente de determinação (0,99) e nível de significância superior a 99% (Tabela 2).

Segundo Araujo et al. (2014), a diferença de pressão parcial de vapor entre o produto e o ar de aquecido, que ocorre durante o processo de secagem, promove a redução do teor de água do produto, influenciando diretamente na massa de grãos. Esse comportamento também foi relatado por Davies e Zibokere (2011) com feijão-caupi,

Goneli et al. (2008) com mamona e com grãos e frutos de amendoim (ARAÚJO et al., 2014 e 2015).

4.4. Forma e Tamanho

As magnitudes das dimensões características, diâmetro geométrico, volume individual, índices de contração das dimensões características, circularidade e esfericidade das sementes de feijão-caupi, para os diferentes teores de água obtidos durante a secagem, seguem na Tabela 3.

TABELA 3. Dimensões características, diâmetro geométrico (D_g), volume unitário (V_g), índices de contração, circularidade (C) e esfericidade (E_s) de sementes de feijão-caupi em função do teor de água.

U ¹	Dimensões características			D_g (mm)	V (mm ³)	Índices de contração			C (%)	E_s (%)
	(mm)					Ψ_a	Ψ_b	Ψ_c		
	A	B	c							
0,47	10,27	7,14	5,72	7,48	218,93	1,00	1,00	1,00	69,52	72,90
0,39	9,98	6,91	5,67	7,32	205,06	0,97	0,97	0,99	69,29	73,32
0,32	9,77	6,81	5,64	7,21	196,67	0,95	0,95	0,99	69,72	73,82
0,25	9,66	6,74	5,60	7,14	190,96	0,94	0,94	0,98	69,81	73,97
0,19	9,57	6,71	5,59	7,11	187,93	0,93	0,94	0,98	70,08	74,22
0,15	9,44	6,63	5,56	7,03	182,36	0,92	0,93	0,97	70,30	74,54
0,11	9,35	6,58	5,54	6,98	178,49	0,91	0,92	0,97	70,33	74,69

¹ teor de água (decimal, b.s.).

Conforme o decréscimo do teor de água as dimensões características do produto (a, b e c) apresentaram reduções. Para faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s., os índices de contração indicados na Tabela 3 demonstram que as dimensões de comprimento (a) e largura (b) das sementes de feijão-caupi apresentaram valores de contração próximos, 9 e 8%, respectivamente. Entretanto, para a mesma faixa de teor de água, a espessura (c) reduziu apenas 3%, possivelmente em função da formação de espaços vazios no interior das sementes deste estudo (Figura 4), dificultando a redução da espessura do produto.

Esse comportamento para a variação das dimensões características das sementes (Tabela 3) também foi encontrado por Di Lanaro et al. (2011), com sementes de feijão-caupi, feijão comum (RESENDE et al., 2005) e demais produtos agrícolas,

como grãos de soja (RIBEIRO et al., 2005), mamona (GONELI et al., 2011) e grãos de amendoim (ARAUJO et al., 2014).

Davies e Zibokere (2011) verificaram que as dimensões a, b e c do produto variaram, respectivamente, acerca de 21,5 a 33,6; 18,0 a 24,6 e 14,0 a 26,0%, para uma faixa de teor de água de 0,15 a 0,30 decimal b.s., sendo uma variação superior ao do presente estudo (Tabela 3), embora tenha apresentado o mesmo comportamento. Provavelmente, essa divergência de resultados obtidos esteja relacionada às particularidades físicas apresentadas pelos genótipos de mesma espécie.

Na faixa do teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s. (Tabela 3) o diâmetro geométrico (D_g) das sementes de feijão-caupi apresentou redução de aproximadamente 6,7% em relação ao seu valor inicial. Tendência encontrada por Davies e Zibokere (2011), também com feijão-caupi, porém, os valores eram superiores aos da atual pesquisa 20,1 a 26,8 %. Essa divergência entre resultados, possivelmente, se deve às peculiaridades físicas verificadas entre os genótipos de mesma espécie, como diferenças nos tamanhos dos diâmetros geométricos. A mamona (GONELI et al., 2011) os grãos e frutos de amendoim (ARAUJO et al., 2014 e 2015) também obtiveram a mesma tendência

Em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s., o volume unitário do produto teve sua magnitude reduzida em aproximadamente 18,5% em relação ao volume inicial, estando de acordo com o comportamento verificado no feijão comum (RESENDE et al., 2005), amendoim (ARAUJO et al., 2014 e 2015), frutos de pinhão-manso (SIQUEIRA et al., 2012d) e grãos de soja (RIBEIRO et al., 2005). Davies e Zibokere (2011) verificaram que o volume unitário das sementes de feijão-caupi variou de 40,6 a 54,7%, em uma faixa de teor de água de 0,15 a 0,30 decimal b.s.

Na faixa de teor de água compreendida entre 0,47 a 0,39 decimal b.s., a circularidade do produto sofreu leve decréscimo, 0,23%, seguida de acréscimo de 1,04% entre os teores de água de 0,39 a 0,11 decimal b.s. A esfericidade das sementes de feijão-caupi, em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s. aumentou em 1,79%.

Os valores de circularidade e esfericidade do produto pouco variaram e, de modo geral, o produto tendeu a ficar mais circular e esférico conforme a redução do seu teor de água (Tabela 3). Comportamento semelhante ao verificado por Di Lanaro et al. (2011), também com feijão-caupi, e Resende et al. (2005), com feijão-comum. Porém, não condizem com alguns resultados encontrados em outros produtos agrícolas, como,

frutos do pinhão-mansô (SIQUEIRA et al., 2012d) e grãos e frutos de amendoim (ARAUJO et al., 2014 e 2015), os quais tiveram seus valores de circularidade e esfericidade decrescidos, conforme a redução de seus teores de água. Já Davies e Zibokere (2011) não constataram tendência definida para a esfericidade de sementes de feijão-caupi, frente à variação de seus respectivos teores de água. Esses resultados contrariam os obtidos por Goneli et al. (2011).

Os valores da circularidade e da esfericidade do produto pouco variaram e mantiveram-se abaixo de 71 e 75%, respectivamente. Tais valores impossibilitaram a classificação do produto como circular ou esférico independente do teor de água, pois, Goneli et al. (2011) consideraram que, para que produtos agrícolas sejam considerados como circulares e esféricos, esses devem apresentar magnitudes acima de 90%. Resultados similares foram relatados por Davies e Zibokere (2011), também com feijão-caupi, Resende et al. (2005), com feijão-comum, e por Araujo et al. (2014 e 2015), com grãos e frutos de amendoim, respectivamente.

Os valores observados e estimados da área projetada das sementes de feijão-caupi como função dos diferentes teores de água obtidos durante a secagem, seguem na Figura 7.

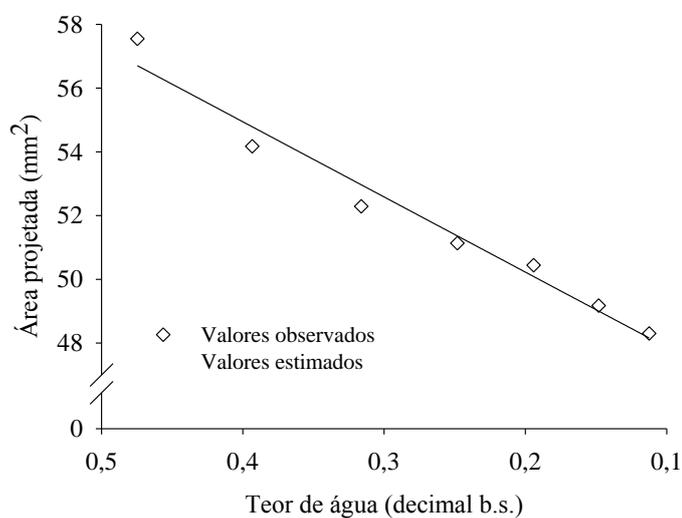


FIGURA 7. Valores observados e estimados da área projetada de sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água.

À medida que se reduziu o teor de água, houve redução dos valores da área projetada das sementes de feijão-caupi (Figura 7). Os valores experimentais variaram em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s. e de 57,5 a 48,3 mm²,

representando um decréscimo de acerca de 16,1%, sendo esse fenômeno satisfatoriamente representado por um modelo de regressão linear, apresentando elevado valor de coeficiente de determinação e nível de significância superior a 99% (Tabela 4). Estando de acordo com outros produtos agrícolas (GONELI et al., 2008).

Os resultados obtidos para a área projetada das sementes de feijão-caupi (Figura 7) estão de acordo com os verificados para sementes de frutos de pinhão-manso (SIQUEIRA et al., 2012d), grãos e frutos de amendoim (ARAUJO et al., 2014 e 2015).

TABELA 4. Equações ajustadas aos dados experimentais das propriedades geométricas das sementes de feijão-caupi, com seus respectivos valores de coeficiente de determinação (R^2), de F calculado (F) e nível de significância (Plevel).

Propriedades físicas	Modelo	R^2 (decimal)	F	P _{level}
Área projetada	$A_p = 45,5073 + 23,5918U$	0,9647	165,0659	<0,0001
Área superficial ¹	$S = 146,4173 + 58,4474U$	0,9731	218,0484	<0,0001
Área superficial ²	$S = 150,7743 + 62,8128U$	0,9738	224,2332	<0,0001
Relação superfície volume	$SV = 0,9009 - 0,1366U$	0,9868	449,0401	<0,0001
Relação superfície massa	$S_w = 331,2315 * W^{0,4779}$	0,9681	183,3059	<0,0001

¹ e ² Área superficial calculada pelo método de Tunde-Akintunde e Akintunde (2004) e Mohsenin (1986), respectivamente; U: teor de água (decimal b.s.); e W: massa do produto (g).

Os valores observados e estimados da área superficial das sementes de feijão-caupi, seguem na Figura 8.

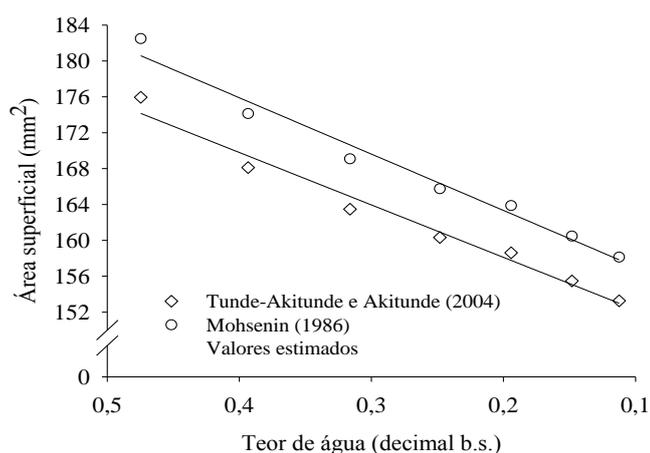


FIGURA 8. Valores observados e estimados da área superficial de sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água, utilizando-se modelos propostos por diferentes autores.

Independente do método utilizado para o cálculo da área superficial do produto observa-se que, conforme decresceu o teor de água, as sementes de feijão-caupi tiveram seus valores de área superficial reduzidos (Figura 8). Quando calculada pelo método proposto por Tunde-Akitunde e Akitunde (2004), em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s., os valores médios experimentais da área superficial do produto variaram de 176,0 a 153,3 mm², representando uma redução de 12,9% (Figura 8). Porém, quando se empregou o método proposto por Mohsenin (1986), para a mesma faixa de teor de água, os valores variaram de 182,5 a 158,1 mm², representando um decréscimo de 13,4% em sua magnitude. A relação entre seu teor de água e a área superficial do produto, para os dois métodos, pode ser satisfatoriamente representada por um modelo de regressão linear, apresentando elevados valores de coeficiente de determinação e níveis de significância superiores a 99% (Tabela 4).

Araujo et al. (2015) comparam as equações de Mohsenin (1986) e Tunde-Akitunde e Akitunde (2004) que tinham como objetivo determinar a área superficial de produtos agrícolas, concluíram que a de Mohsenin (1986) possui maior precisão, pois, apresenta ajustes matemáticos relacionados a comprimento, largura e espessura do produto.

Siqueira et al. (2012d), concluiu que é possível ajustar uma única equação aos dados experimentais do volume e da área superficial dos frutos de pinhão-manso ao longo da secagem em diversas temperaturas, demonstrando o quanto está relacionada essas duas propriedades físicas. Esse comportamento evidencia a contração das dimensões características das sementes de feijão-caupi com a redução do seu teor de água. Resultados similares foram verificados por Davies e Zibokere (2011) com feijão-caupi, e por diversos pesquisadores para diferentes produtos agrícolas (GONELI et al., 2008; SIQUEIRA et al., 2012d; ARAUJO et al., 2014 e 2015).

Na Figura 9 seguem os valores observados e estimados da relação entre a área superficial, obtida pelo método de Mohsenin (1986), e o volume das sementes de feijão-caupi para os diferentes teores de água obtidos durante a secagem.

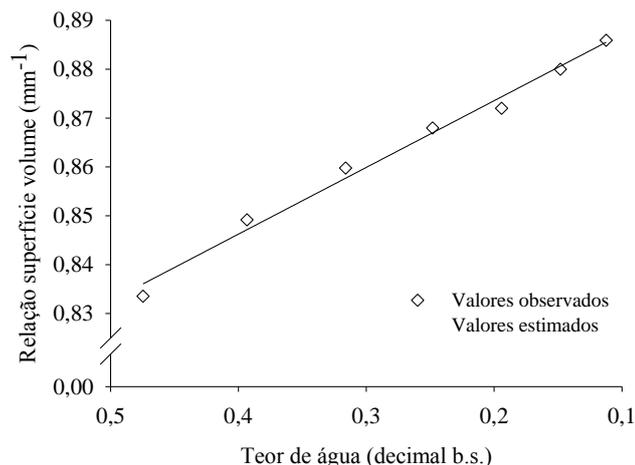


FIGURA 9. Valores observados e estimados da relação superfície volume de sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água.

Conforme reduziu o teor de água a relação superfície volume aumentou. Os valores experimentais sofreram um incremento de, aproximadamente, 6,3% em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s. Esse fenômeno foi satisfatoriamente representado por um modelo de regressão linear, apresentando elevado valor de coeficiente de determinação e nível de significância superior a 99% (Tabela 4).

Na Tabela 4 está a equação que representa a relação entre a área superficial e a massa das sementes de feijão-caupi. Essa equação foi obtida por meio de regressão não linear, onde, apresentou magnitude de coeficiente de determinação superior a 0,96 decimal e nível de significância do modelo de regressão ao nível de 1%.

A relação superfície volume indicou que a redução da área superficial das sementes de feijão-caupi não acompanhou a redução do volume do produto, assim, promovendo acréscimos em seus valores, concordando com os resultados obtidos com pinhão-manso (SIQUEIRA et al., 2012d) e grãos e frutos de amendoim (ARAUJO et al., 2014 e 2015).

4.6. Índice de Contração Volumétrica da Massa e Unitária

Na Tabela 5 estão os valores de desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) para os diferentes modelos de índice de contração volumétrica da massa (ψ_m) e unitária (ψ_u) das sementes de feijão-caupi.

TABELA 5. Valores de desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) para os diferentes modelos de índice de contração volumétrica da massa (ψ_m) e unitária (ψ_u) das sementes de feijão-caupi.

Modelos	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)
	ψ_m (adimensional)		
Bala e Woods (1984), modificado	0,0018	0,1678	0,9999
Exponencial	0,0082	0,7560	0,9977
Polinomial	0,0015	0,1277	0,9999
Linear	0,0143	1,3253	0,9931
Corrêa et al. (2004)	0,0048	0,4025	0,9992
Rahman (1995)	0,0162	1,6160	0,9893
Modelos	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)
	ψ_u (adimensional)		
Bala e Woods (1984), modificado	0,0064	0,4746	0,9958
Exponencial	0,0090	0,7168	0,9917
Polinomial	0,0076	0,5569	0,9952
Linear	0,0103	0,8420	0,9890
Corrêa et al. (2004)	0,0062	0,5010	0,9960
Rahman (1995)	0,0124	1,0566	0,9810

Todos os modelos empregados para representar o índice de contração volumétrica da massa e unitária das sementes de feijão-caupi apresentaram valores de coeficiente de determinação superiores a 0,98 decimal (Tabela 5). Porém, segundo Mohapatra e Rao (2005) a utilização do coeficiente de determinação como único critério para a seleção de modelos matemáticos não-lineares, não é considerado adequado, o ideal é analisar em conjunto outros parâmetros estatísticos.

Para o índice da contração volumétrica da massa e unitária, todos os modelos apresentaram valores reduzidos de desvio padrão da estimativa e magnitudes de erro médio relativo inferiores a 2%. (Tabela 5), mostrando que todos os modelos foram satisfatórios.

O modelo Polinomial foi selecionado para a representação de ambos os índices de contração volumétrica, da massa e unitária. Esse modelo polinomial, foi

utilizado por Goneli et al. (2011) para representar ambos os índices em frutos de mamona.

Na Figura 10 estão os valores observados e estimados, pelo modelo Polinomial, do índice de contração volumétrica da massa de sementes de feijão-caupi durante a secagem.

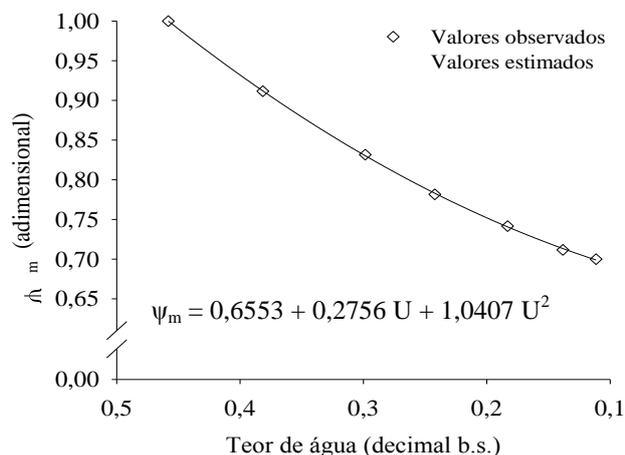


FIGURA 10. Valores observados e estimados do índice de contração volumétrica da massa de sementes de feijão-caupi em função do teor de água.

Em uma faixa de teor de água de, aproximadamente, 0,46 a 0,11 decimal b.s., verifica-se que a massa do produto apresentou uma redução de 30% em relação ao seu volume inicial.

Pode ser observado na Figura 11 estão os valores observados e estimados, pelo modelo Polinomial, do índice de contração volumétrica unitária das sementes de feijão-caupi durante a secagem.

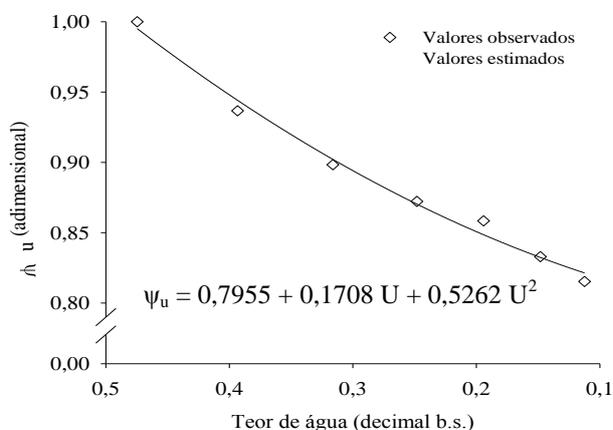


FIGURA 11. Valores observados e estimados do índice de contração volumétrica unitária de sementes de feijão-caupi em função do teor de água.

A Figura 11 demonstra que as sementes de feijão-caupi em uma faixa de teor de água de, aproximadamente, 0,48 a 0,11 decimal b.s. contraíram acerca de 18,5% em relação ao seu volume inicial. Constatou-se também que a contração volumétrica unitária do produto (Figura 11) foi acerca de 11,5% inferior à do volume da massa do mesmo (Figura 10), comportamento comum foi encontrado para sementes de feijão-comum (RESENDE et al., 2005) e frutos de mamona (GONELI et al., 2011), onde a média, das contrações volumétricas unitárias desses produtos, foram, em torno de 14% inferiores à da massa dos mesmos.

Os comportamentos das curvas apresentadas nas Figuras 10 e 11, considerando-se que as faixas de teores de água avaliadas foram semelhantes, possivelmente, justificam o aumento observado para a massa específica aparente em contraste ao decréscimo da massa específica unitária, conforme as reduções dos teores de água nas Figuras 2 e 3.

O fato da evolução do desprendimento dos cotilédones, conforme a redução do teor de água, ter acarretado na formação de espaços vazios no interior das sementes de feijão-caupi, pode ter dificultado na redução das dimensões externas do produto durante a dessecção, resultando em menor intensidade de contração volumétrica individual (Figura 11). Por outro lado, o mesmo fato, possivelmente, não teve forte influência sobre a contração volumétrica da massa do material, pois, quando em conjunto, as sementes de feijão-caupi tenderam a se rearranjarem durante a secagem, reduzindo a porosidade intergranular (Figura 6) e, resultando em maior amplitude de contração volumétrica (Figura 10).

5. CONCLUSÃO

- Todas as propriedades físicas das sementes de feijão-caupi sofreram alterações, conforme redução do teor de água, dentro da faixa de umidade avaliada;
- A redução do teor de água do feijão-caupi ao longo da secagem acarretou em aumento nos valores das seguintes propriedades físicas: massa específica aparente, esfericidade e relação superfície volume;
- À medida que se reduziu o teor de água do produto, também se reduziram os valores da: massa específica real ou unitária, porcentagem de porosidade intergranular, massa das mil sementes, dimensões características (a, b e c), diâmetro geométrico, volume unitário, circularidade e área projetada e área superficial.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.349-353, 1999.

ALI, K; MALTESE, F; CHOI, Y; VERPOTE, R. Metabolic constituents of grapevine and grape-derived products. **Phytochemistry Reviews**, v. 9, n. 3, p. 357-378, sept. 2010.

ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; ORLANDO, R.C.; MARTINS, E.A.S.; HARTMANN FILHO, C.P. Propriedades físicas dos frutos de amendoim durante a secagem. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.28, n.4, p.170-180, 2015.

ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; SOUZA, C.M.A.; GONÇALVES, A.A.; VILHASANTI, H.C.B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.3, p.279-286, 2014.

BALA, B.K.; WOODS, J.L. Simulation of deep bed malt drying. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v.30, n.3, p.235-244, 1984.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2009. 395p.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 5.ed. FUNEP: Jaboticabal, 2012. 590p.

CONAB. (2016). **Acompanhamento da Safra Brasileira 15/16: Grãos**. Fevereiro/2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_02_04_09_05_00_boletim_gaos_fevereiro_2016.pdf>. Acesso em: 09/04/2016.

CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; GONELI, A.L.D. Mathematical modelling for representation of coffee berry volumetric shrinkage. In: International Drying Symposium, 14th. **Drying 2004**, 2004, São Paulo: Brazil, v.A, p.742-747.

DAVIES, R.M.; ZIBOKERE, D.S. Effects of moisture content on some physical and mechanical properties of three varieties of cowpea (*vigna unguiculata* (L) walp). **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, Beijing, v.13, n.1, p.1-8, 2011.

DI LANARO, N.; BAJAY, L.G.; QUEIROZ, V.M.P.; PINTO, R.C.S.; LEITÃO, I.G.A.; LESSIO, B.C.; AUGUSTO, P.E.D. Determinação de propriedades físicas do feijão fradinho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.13, n.1, p.27-35, 2011.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Meio Norte. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cultivo de Feijão-Caupi: Sistema de Produção**, 2. ed., Jan/2003.

FREIRE-FILHO, FRANCISCO RODRIGUES. Feijão-Caupi no Brasil Produção, melhoramento genético, avanços e desafios. **EMBRAPA MEIO NORTE**, Teresina, 2011.

GELY, M. C; GINER, S. A.; Diffusion Coefficient Relationships during Drying of Soya Bean Cultivars. **Biosystems Engineering**, v. 96 (2), pag. 213–222, 2007.

GONELI, A. L. D. ; CORRÊA, P. C. ; AFONSO JÚNIOR, P. C. ; OLIVEIRA, G.H.H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. Café, n. 11, p. 64-73, 2009.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; OLIVEIRA, G.H.H.; SANTOS, E.S. Propriedades físicas dos frutos de mamona durante a secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.33, n.2, p.148-155, 2008.

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**, Maringá, v.33, n.1, p.1-8, 2011.

MENEGHETTI, V.L.; AOSAN, E.; ROCHA, J.; OLIVEIRA, M. ELIAS, M.C.; POHNDORF R.S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.16, n.10, p.1115–1120, 2012.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S.A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, London, v.66, n.4, p.513-518, 2005.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.

RAHMAN, S. **Physical properties of foods**. Florida: CRC Press LLC, 1995. 500p.

RAMOS, I.N.; BRANDÃO, T.R.S.; SILVA, C.L.M. Structural changes during air drying of fruits and vegetables. **Food Science and Technology International, Mysuru**, v.9, n.3, p.201-206, 2003.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.10, n.1, p.17-26, 2008a.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; CECON, P.R. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.7, n.1, p.15-24, 2005.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; RIBEIRO, D.M. Propriedades físicas do feijão durante a secagem: determinação e modelagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.32, n.1, p.225-230, 2008b.

RESENDE, O.; FERREIRA, L.U.; ALMEIDA, D.P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.12, n.2, p.171-178, 2010.

RIBEIRO, D.M.; CORRÊA, P.C.; RODRIGUES, D.H.; GONELI, A.L.D. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.25, n.3, p.611-617, 2005.

SILVA, S.M.S.; MAIA, J.M.; ARAÚJO, Z.B.; FREIRE FILHO, F.R. **Composição Química de 45 Genótipos de Feijão-caupi** (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2002. 2p. (Embrapa Meio-Norte. Comunicado Técnico, 149).

SIQUEIRA, V.C.; OSVALDO RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; SOARES, F.A.L. Forma e tamanho dos frutos de pinhão-manso durante a secagem em cinco condições de ar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.8, p.864-870, 2012d.

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

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Propriedades físicas das sementes de pinhão-manso ao longo da secagem em diferentes temperaturas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.33, suplemento 1, p.2705-2714, 2012b.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Propriedades físicas dos frutos de pinhão-manso durante a secagem. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v.5, n.1, p.83-92, 2012c.