

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
PRÓ REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS-AGRONOMIA

HIGROSCOPICIDADE, PROPRIEDADES MECÂNICAS E
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FISIOLÓGICA DAS
SEMENTES DE CANOLA DURANTE A SECAGEM E O
ARMAZENAMENTO

Autora: LÍlian Moreira Costa
Orientador: Osvaldo Resende

RIO VERDE – GO
Outubro – 2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS-AGRONOMIA

HIGROSCOPICIDADE, PROPRIEDADES MECÂNICAS E
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FISIOLÓGICA DAS
SEMENTES DE CANOLA DURANTE A SECAGEM E O
ARMAZENAMENTO

Autora: LÍlian Moreira Costa

Orientador: Osvaldo Resende

Tese apresentada como parte das exigências para obtenção do título de DOUTORA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de Concentração Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

Rio Verde – GO

Outubro - 2018

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

L728h
h Costa, LÍlian Moreira
Higroscopicidade, propriedades mecânicas e
avaliação da qualidade fisiológica das sementes de
canola durante a secagem e o armazenamento / LÍlian
Moreira Costa; orientador Osvaldo Resende. -- Rio
Verde, 2018.
107 p.

Tese (Doutorado em Pós-Graduação Stricto Sensu em
Ciências Agrárias-Agronomia) -- Instituto Federal
Goiano, Campus Rio Verde, 2018.

1. modelos matemáticos. 2. germinação. 3. teor de
água de equilíbrio. 4. deformação. I. Resende,
Osvaldo, orient. II. Título.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS-AGRONOMIA

HIGROSCOPICIDADE, PROPRIEDADES MECÂNICAS E AVALIAÇÃO DA
QUALIDADE FISIOLÓGICA DAS SEMENTES DE CANOLA DURANTE A
SECAGEM E O ARMAZENAMENTO

Autora: Lílian Moreira Costa
Orientador: Dr. Osvaldo Resende

TITULAÇÃO: Doutora em Ciências Agrárias - Agronomia - Área de
Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em 05 de outubro de 2018.

Dr. José Ronaldo Quirino
Avaliador externo
Caramuru S.A, Rio Verde - GO

Dr. Dieimisson Paulo Almeida
Avaliador externo
Centro Tecnológico Comigo (CTC)
Comigo LTDA, Rio Verde - GO

Dr. Daniel Emanuel Cabral de Oliveira
Avaliador interno
IF Goiano - Campus Iporá

Dr.^a Kelly Juliane Telles Nascimento
Avaliadora interna
IF Goiano - Campus Rio Verde

Dr. Osvaldo Resende
Orientador - Presidente da banca
IF Goiano - Campus Rio Verde

Aos meus queridos pais, Rosalina Moreira Costa e *Sebastião Moreira Costa

*(*In memoriam)*

Pelo amor, apoio e bom exemplo,

OFEREÇO!

À minha Família:

Pais, Irmãos, sobrinhos e cunhadas (o),

Pelo incentivo, paciência, compreensão e amor que nos une.

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Osvaldo Resende pela orientação, pela confiança, por me proporcionar conhecimento, aprendizado e pela dedicação prestada ao longo dessa jornada, meus eternos agradecimentos.

As secretárias do DPPG, pelo brilhante atendimento.

A todos os professores do IF Goiano, que contribuíram para minha formação acadêmica.

Aos meus colegas de Pós-Graduação, por compartilhar experiências e aprendizados durante as horas dedicadas à nossa formação.

A CAPES e ao CNPq, pelas bolsas concedidas.

Ao IF Goiano Campus Rio Verde e Campus Iporá.

Ao Daniel Emanuel Cabral de Oliveira, pela amizade, colaboração nos trabalhos desenvolvidos ao longo da minha Pós-Graduação e obrigada pela forma que atende e apoia a todos que o procuram.

Agradeço aos meus colegas e amigos do Laboratório de Pós-Colheita, por tornarem o IF Goiano um lugar mais agradável, onde encontrei pessoas gentis, dignas, humildes e engraçadas, que marcaram minha vida eternamente, e que ao longo da minha jornada na Pós-Graduação fizeram a diferença, uns contribuindo com trabalho braçal e intelectual outros contribuindo com apenas um cumprimento de bom dia ou um até logo que também foi muito importante. Alguns ainda trabalhando no Laboratório outros já com suas profissões definidas em algum lugar do Brasil e até mesmo no exterior. (Dieimisson Almeida, Udenys Mendes, Renan Ullmann, Tarcísio Chaves, Douglas Gonçalves, Anderson Rigo, Estevão Rodrigues, Kaique Marçal, Rafael Campos, Denner Guimarães, Rayr Lima, Lênio Ferreira, Kelly Souza, Jéssica Souza, Mariana Prado,

Herbert Silva, Waldiney Siqueira, Thaís Smaniotto, Iaquine Bezerra, Daiana Silva, Sandriane Borges, Francilene Gomes, Lílian Silva, Nubia Branquinho, Jaqueline Bessa, Zirvaldo Virgolino, Adrieli Kester, José Ronaldo Quirino, Gabrielly Rodrigues, Lígia Silva, Diene Sousa, Rosana Silva, Natália Fonsceca, Maria Lopes, Bruna Sousa, Sebastião Neto, Pâmella Oliveira, Weder Junior, Igor Silva, Fernanda Mendes, Jáliston Alves, Luana Oliveira, Eduarda Ribeiro, Manoel Ricardo, Fábio Oliveira, Gleyce Kelly, Jennifer). Obrigada pela “interação” científica e pelos inúmeros momentos de descontração. Vocês são pessoas que têm o dom de jamais serem esquecidas!

BIOGRAFIA DA AUTORA

LÍLIAN MOREIRA COSTA, filha de Sebastião Moreira Costa e Rosalina Moreira Costa, nascida em Rio Verde, Goiás. Em 2004, ingressou no curso de graduação pelo IF Goiano – Campus Rio Verde, em Tecnologia em Produção de Grãos, concluído em 2007. Em 2011, ingressou-se no curso Bacharelado em Agronomia pelo IF Goiano – Campus Rio Verde, concluindo em 2017. Em 2009, iniciou no Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Ciências Agrárias pelo IF Goiano Campus Rio Verde, realizando a pesquisa para a dissertação de mestrado na área de Pós-Colheita em armazenamento e secagem de grãos, concluindo em 2011. Em 2015 ingressou no Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Ciências Agrárias – Agronomia, pelo IF Goiano Campus Rio Verde, com linha de pesquisa em Pós-Colheita, em outubro de 2018 defendeu-se sua Tese.

ÍNDICE GERAL

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	xiii
RESUMO GERAL.....	xvi
GENERAL ABSTRACT	xviii
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1 Cultura da canola.....	3
1.2 Armazenagem de produtos agrícolas.....	4
1.3 Cinética de Secagem.....	6
1.4 Higroscopicidade.....	8
1.5 Modelos Matemáticos.....	9
1.6 Comportamento Mecânico das sementes.....	10
1.7 Referências Bibliográficas.....	11
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 Geral.....	19
2.2 Específicos.....	19
 CAPÍTULO I - CINÉTICA DA SECAGEM DE SEMENTES DE CANOLA.....	 20
RESUMO.....	20
ABSTRACT.....	20
1 INTRODUÇÃO.....	21

2 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4 CONCLUSÕES.....	32
5 AGRADECIMENTOS.....	33
6 REFERÊNCIAS.....	33
CAPÍTULO II - INFLUÊNCIA DA SECAGEM E ARMAZENAMENTO NA QUALIDADE FISIOLÓGICA DAS SEMENTES DE CANOLA.....	37
RESUMO.....	37
ABSTRACT.....	37
1 INTRODUÇÃO.....	38
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4 CONCLUSÕES.....	52
5 AGRADECIMENTOS.....	52
6 REFERÊNCIAS.....	52
CAPÍTULO III - ISOTERMAS DE DESSORÇÃO E CALOR ISOSTÉRICO DAS SEMENTES DE CANOLA.....	56
RESUMO.....	56
ABSTRACT.....	56
1 INTRODUÇÃO.....	57
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	58
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
4 CONCLUSÕES.....	68
5 AGRADECIMENTOS.....	68
6 REFERÊNCIAS.....	69
CAPÍTULO IV - COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS SEMENTES DE CANOLA EM FUNÇÃO DO TEOR DE ÁGUA.....	73
RESUMO.....	73
ABSTRACT.....	73
1 INTRODUÇÃO.....	74

2 MATERIAL E MÉTODOS.....	75
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
4 CONCLUSÕES.....	80
5 AGRADECIMENTOS.....	81
6 REFERÊNCIAS.....	81
CONCLUSÃO GERAL.....	84

ÍNDICE DE TABELA

	Página
CAPÍTULO I - CINÉTICA DA SECAGEM DE SEMENTES DE CANOLA.....	20
Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para predizer a secagem de produtos agrícolas.	23
Tabela 2 - Valores para o teste de erro médio estimado (SE, decimal), <i>Qui-quadrado</i> (χ^2 , decimal x 10 ⁻⁴), Coeficientes de determinação (R ² , decimal) e erro médio relativo (P, %) calculados para os onze modelos utilizados na representação da cinética de secagem das sementes de canola (<i>Brassica napus</i> L.).	28
Tabela 3 – Valores dos parâmetros (Pa) dos modelos Wang e Singh, Page e Midilli, ajustados para as diferentes condições de secagem das sementes de canola (<i>Brassica napus</i> L.).	29
CAPÍTULO II - INFLUÊNCIA DA SECAGEM E ARMAZENAMENTO NA QUALIDADE FISIOLÓGICA DAS SEMENTES DE CANOLA.....	37
Tabela 1 - Resumo da análise de variância para as sementes de canola secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses.....	43
CAPÍTULO III - ISOTERMAS DE DESSORÇÃO E CALOR ISOSTÉRICO DAS SEMENTES DE CANOLA.....	56
Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para predizer o fenômeno de higroscopicidade de produtos vegetais.....	59
Tabela 2 - Valores médios do teor de água de equilíbrio (% bs) das sementes de canola (<i>Brassica napus</i> L.), obtidos pelo processo de adsorção, em função da temperatura e da atividade de água.....	62

Tabela 3 - Parâmetros dos modelos ajustados aos teores de água de equilíbrio higroscópico para as sementes de canola (*Brassica napus* L.) com seu respectivo erro médio estimado (SE, decimal), *Qui*-quadrado (χ^2 , decimal), coeficientes de determinação (R^2 , decimal) e erro médio relativo (P, %)...... 63

Tabela 4 – Valores do teor de água de equilíbrio (% b.s.) das sementes de canola (*Brassica napus* L.) híbrido Hyola 430 estimados pelo modelo de Halsey Modificado, em função da Temperatura (T) e da Umidade Relativa de Equilíbrio (URE). 66

CAPÍTULO IV - COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS SEMENTES DE CANOLA EM FUNÇÃO DO TEOR DE ÁGUA..... 73

Tabela 1 - Modelos ajustados aos valores experimentais do módulo proporcional de deformidade da canola (E_p) em função do teor de água (X) e da deformação (D)..... 79

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
INTRODUÇÃO GERAL	1
Figura 1 - Planta e sementes de <i>Brassica napus</i>	3
Figura 2 - Curvas típicas de secagens.....	7
CAPÍTULO I - CINÉTICA DA SECAGEM DE SEMENTES DE CANOLA.....	20
Figura 1 - Razão de teor de água das sementes de canola (<i>Brassica napus</i> L.) ao longo do tempo de secagem em quatro condições de temperatura.....	27
Figura 2 - Valores dos teores de água experimentais e estimados pelo modelo Page para a secagem das sementesde canola (<i>Brassica napus</i> L.), nas diversas condições de temperatura.	30
Figura 3 – Valores médios do coeficiente de difusão efetivo ($m^2 s^{-1}$), obtido para a secagem das sementes de canola (<i>Brassica napus</i> L.) nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C.	31
Figura 4 - Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo obtido para a secagem das sementes de canola (<i>Brassica napus</i> L.) nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C.	32
CAPÍTULO II - INFLUÊNCIA DA SECAGEM E ARMAZENAMENTO NA QUALIDADE FISIOLÓGICA DAS SEMENTES DE CANOLA.....	37
Figura 1 - Médias de Temperatura e Umidade Relativa do ar no ambiente de armazenamento das sementes de canola, secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses.	42
Figura 2 – Condutividade elétrica das sementes de canola secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses.....	46
Figura 3 - Valores experimentais e estimados. A: primeira contagem de germinação. B: segunda contagem de germinação. C: germinação total. D:	

germinação do teste de frio. E: índice de velocidade de germinação, das sementes de canola secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses.....	47
Figura 4 - A: plântulas normais. B: plântulas normais do teste de frio. C: plântulas anormais. D: plântulas anormais teste de frio, das sementes de canola secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses.....	49
Figura 5 - A: comprimento de hipocótilo. B: comprimento de raiz. C: massa seca de plântulas normais, das sementes de canola secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses.....	51
Figura 6 - A: Sementes não germinadas (SNG). B: sementes não germinadas (SNG) do teste de frio das sementes de canola secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses.....	51
CAPÍTULO III - ISOTERMAS DE DESSORÇÃO E CALOR ISOSTÉRICO DAS SEMENTES DE CANOLA.....	56
Figura 1 - Valores experimentais do teor de água de equilíbrio e isotermas de dessecção estimadas pelo modelo de Halsey Modificado para as sementes de canola (<i>Brassica napus</i> L.), em diferentes condições de temperatura e atividades de água...	65
Figura 2 - Valores experimentais e estimados do calor isostérico integral de dessecção em função do teor de água de equilíbrio para as sementes de canola (<i>Brassica napus</i> L.), em diferentes condições de temperatura e atividades de água.....	67
CAPÍTULO IV - COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS SEMENTES DE CANOLA EM FUNÇÃO DO TEOR DE ÁGUA.....	73
Figura 1 - Orientação das sementes de canola durante os ensaios de compressão (menor eixo- espessura). Fonte: Adaptado de Resende et al. (2007).....	76
Figura 2 - Raios de curvatura do grão de canola (r e R) na região de contato entre o produto e a placa de compressão. L= comprimento, E= espessura.....	77
Figura 3 - Valores médios da força máxima de compressão, em função do teor de água para as deformações de $0,2 \times 10^{-4}$; $0,4 \times 10^{-4}$, $0,6 \times 10^{-4}$, $0,8 \times 10^{-4}$, $1,0 \times 10^{-4}$, $1,2 \times 10^{-4}$, $1,4 \times 10^{-4}$, $1,6 \times 10^{-4}$, $1,8 \times 10^{-4}$ e $2,0 \times 10^{-4}$ m para as sementes de canola (<i>Brassica napus</i> L.).....	78
Figura 4 - Valores médios do módulo proporcional de deformidade (E_p) das sementes de canola (<i>Brassica napus</i> L.) para cada teor de água, em função do teor de água e da deformação.	79
Figura 5 - Valores médios da força de ruptura em função do teor de água, para as sementes de canola (<i>Brassica napus</i> L.).	80

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

a, b, c, n	coeficientes dos modelos
%	Porcentagem
&	“E” comercial
±	Para mais e/ou para menos
°C	graus Celsius
AOSA	Association of Official Seed Analysis
B.O.D.	Biochemical Oxygen Demand
b.u.	base úmida
b.s.	Base seca
cm	centímetro (s)
CPN	Comprimento de Plântulas Normais
CV	Coeficiente de Variação
D	coeficiente de difusão líquida
DAS	Dias Após a Semeadura
d _n	enésimo dia
DTA	Diferentes Teores de Água
D _o	fator pré-exponencial
E _a	energia de ativação
et al.	<i>et alia</i> (e outros)
Eq.	Equação
FMS	Fundação Mato Grosso do Sul
g	grama (s)
GO	Goiás

GLR	graus de liberdade
H	Hipocótilo
h	hora (s)
ha	hectare (s)
ISTA	International Seed Testing Association
IVG	Índice de Velocidade de Germinação
kg	kilograma (s)
kJ mol^{-1}	Quilojoule por mol
k, k_0, k_1	constantes de secagem
L	Litro (s)
mL	mililitro (s)
mm	milímetro (s)
m	metro
$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	metros quadrado por segundo
n_n	enésimo número
N	Newton
n	número
OCEPAR.	Organização das Cooperativas do Estado do Paraná
P	erro médio relativo
Pa	pascal
PET	polietileno tereftalato
PVC	cloreto de vinila
R	Raiz
r	raio equivalente
RX	razão de teor de água
R^2	coeficiente de determinação
sp	espécie
SE	erro médio estimado
T_{ab}	temperatura absoluta
*t	tratamento na equação
t.	tonelada (s)
t	tempo de secagem
T	Temperatura

T_a	Tempo de armazenamento
T_n	Tratamentos
USDA	United States Department of Agriculture
μS	microsiemens
V_s	volume das sementes
X	teor de água do produto em determinado tempo de secagem
X_i	teor de água inicial do produto
X_e	teor de água de equilíbrio do produto
χ^2	qui-quadrado
Y	valor experimental
\hat{Y}	valor estimado pelo modelo
λ_n	raízes da equação de Bessel de ordem zero

RESUMO GERAL

COSTA, LÍLIAN MOREIRA. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – GO, outubro de 2018. **Higroscopicidade, propriedades mecânicas e avaliação da qualidade fisiológica das sementes de canola durante a secagem e o armazenamento.** Osvaldo Resende “Orientador”; Juliana de Fátima Sales “Coorientadora”; Valdiney Cambuy Siqueira “Coorientador”.

Nos últimos tempos, pesquisadores têm investido em novas tecnologias, tornando o mercado agrícola e também a cultura da canola, um foco de investimento em óleo vegetal. Essa evolução veio também acompanhada por novas e mais avançadas tecnologias em proteção para sementes e grãos por meio de pesquisas atuais. Considerando a importância do estudo dos processos de secagem e armazenamento de sementes oleaginosas o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo geral de estudar o pré-processamento das sementes de canola. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais do IF Goiano - Campus Rio Verde. Foi realizada a secagem em estufa com condições controladas de temperatura, 40; 60; 80 e 100 °C e umidades relativas de 37,15; 16,93; 8,35; 4,41 e 2,47%, respectivamente, em delineamento inteiramente ao acaso, em três repetições. Para a determinação das curvas de secagem e ajustes dos modelos, foi estabelecido o teor de água final de $0,080 \pm 0,004$ (b.s.), utilizando os modelos matemáticos frequentemente usados para descrever a secagem de produtos agrícolas. Após a cinética de secagem, as sementes foram acondicionadas em sacos de papel kraft, contendo 20 g cada um, avaliadas aos 0, 3, 6 e 9 meses, em 4 repetições, quanto ao: teor de água, condutividade elétrica, germinação: primeira contagem, segunda contagem e total; índice de velocidade de germinação; plântulas normais e anormais; comprimentos do hipocótilo e sistema radicular de plântulas normais; massa seca de plântulas normais, sementes não germinadas e teste de frio modificado, sendo avaliadas: germinação, contagem de

plântulas normais e anormais e sementes não germinadas. As isotermas de dessecção foram determinadas utilizando o método estático indireto. Para cada teor de água de 4,2; 6,6; 7,7; 8,5; 10,0 e 14,0 (% b.s.) foram utilizadas três amostras com 20 g, colocadas individualmente no recipiente do equipamento e acondicionados em B.O.D. nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40 °C. Aos dados experimentais foram ajustados os modelos matemáticos mais utilizados para representação da higroscopicidade. A resistência à compressão foi realizada por meio de ensaios individuais de compressão uniaxial, em amostra de 15 sementes para cada teor de água de 16,2; 13,6; 11,1; 8,6; 6,3; 5,2 e 4,1 (% b.s.) realizado em uma máquina de ensaio universal de teste, modelo “TA Hdi Texture Analyser”, utilizando uma célula de carga de 250 N. O tempo de secagem reduz com o aumento da temperatura, sendo o modelo de Page selecionado para representar a cinética de secagem das sementes de canola. O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura, sendo descrito pela equação de Arrhenius, com energia de ativação de 33,94 kJ mol⁻¹. As temperaturas de secagem influenciam na qualidade fisiológica das sementes e ocasionam maiores reduções de germinação nas sementes secas em temperatura igual e superiores a 60°C. O teste a frio demonstrou que as sementes se desenvolvem melhor em baixas temperaturas. O armazenamento até 180 dias proporcionou melhor conservação da qualidade fisiológica das sementes em todas as variáveis analisadas. O modelo de Halsey Modificado foi adequado para representar a higroscopicidade das sementes de canola para a faixa de temperatura de 10 a 40 °C e atividade de água entre 0,2973 a 0,8770. Os valores de calor isostérico integral de dessecção para as sementes de canola na faixa do teor de água de equilíbrio de 3,99 a 16,62 (% b.s.) variaram de 2,640 a 2.460 kJ kg⁻¹. A força de compressão necessária para deformar sementes de canola diminui com o aumento do teor de água. O módulo proporcional de deformidade aumenta com a redução do teor de água e da deformação do produto obtendo-se valores para a faixa de teor de água estudada, entre 1,48 a 8,13 x 10⁸ N m⁻².

PALAVRAS-CHAVES: modelos matemáticos, germinação, teor de água de equilíbrio, deformação.

GENERAL ABSTRACT

COSTA, LÍLIAN MOREIRA. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (Goiano Federal Institute of Education, Science, and Technology) – Rio Verde Campus – Goiás State (GO), Brazil, October, 2017. **Hygroscopicity, mechanical properties and evaluation of the physiological quality of canola seeds during drying and storage.** Advisor: Resende, Osvaldo; Coadvisor: Juliana de Fátima Sales; Coadvisor: Valdiney Cambuy Siqueira.

In recent times, researchers have invested in new technologies, turning the agricultural market and also the canola culture, a focus of investment in vegetable oil. This evolution has also been accompanied by new and more advanced technologies in seed and grain protection through current research. Considering the importance of the drying and storage processes study of oleaginous seeds, the present work was developed to study the pre-processing of canola seeds and grains. The experiments were carried out at the Post-Harvest Vegetable Products Laboratory of IF Goiano - Campus Rio Verde. Drying was carried out in a greenhouse with controlled temperature conditions, 40; 60; 80 and 100 °C and relative humidity of 37.15; 16.93; 8.35; 4.41 and 2.47%, respectively, in a completely randomized design, in three replicates. For determination of the drying curves and model's adjustment, the final moisture content of 0.080 ± 0.004 (d.b.) was established using the mathematical models frequently used to describe the drying of agricultural products. After the drying kinetics, the seeds were conditioned in kraft paper bags, containing 20 g each, evaluated at 0, 3, 6 and 9 months, in 4 replications, in terms of: moisture content, electrical conductivity, germination: first counting, second count and total; germination speed index; normal and abnormal seedlings; hypocotyl lengths and root system of normal seedlings; normal seedlings dry mass, non-germinated seeds and modified cold test, being evaluated: germination, count of normal and abnormal seedlings and seeds not germinated. The sorption

isotherms were determined using the indirect static method, the water activity being determined by the Hygropalm Model Aw1 equipment. For each moisture content of 4.2; 6.6; 7.7; 8.5; 10.0 and 14.0 (% d.b.) three 20 g samples were used, placed individually in the equipment container and packed in B.O.D. The temperature of 10, 20, 30 and 40 °C and the experimental data were adjusted to mathematical models used to represent hygroscopicity. The compressive strength was performed by means of individual uniaxial compression tests in a sample of 15 grains for each moisture content of 16.2; 13.6; 11.1; 8.6; 6.3; 5.2 and 0.041 (% d.b.) performed on a universal test machine, "TA Hdi Texture Analyzer" model, using a 250 N load cell. The drying time reduces with increasing temperature, with the Page model selected to represent the drying kinetics of canola grains. The effective diffusion coefficient increases with the temperature rise, being described by the Arrhenius equation, with activation energy of 33.94 kJ mol⁻¹. Drying temperatures influence the seeds physiological quality and cause higher germination reductions in dry seeds at temperatures above 60 °C. The cold test showed that seeds develop best at low temperatures. The storage up to 180 days provided better conservation of the seeds physiological quality in all analyzed variables. The Modified Halsey model was the only one suitable to represent the canola seeds hygroscopicity for the temperature range of 10 to 40 °C and water activity between 0.2973 to 0.8770. The total isosteric desorption heat values for canola seeds in the range of the equilibrium moisture content of 3.99 to 16.62 (% d.b.) ranged from 2,640 to 2,460 kJ kg⁻¹. The compression force required to deform canola grains decreases with increasing moisture content. The proportional modulus of deformity increases with the reduction of moisture content and deformation of the product, obtaining values for the moisture content range studied, between 1.48 and 8.13 (x 10⁸ N m⁻²).

KEYWORDS: mathematical models, germination, equilibrium moisture content, deformation.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A canola (*Brassica napus* L.) é uma espécie oleaginosa, da família das Brassicaceae (antigas crucíferas), que foi desenvolvida por melhoramento genético convencional da planta colza (THOMAS, 2013). De acordo com autor seu cultivo se encaixa bem nos sistemas de produção de sementes, constituindo excelente opção de cultura de inverno no Brasil, sendo uma alternativa de rotação de culturas.

Dentro dessa perspectiva, a canola surge como cultura potencial para produção de óleo na época do ano em que há condições desfavoráveis para a maioria das culturas oleaginosas. Portanto, a produção e conhecimento do comportamento da cultura devem ser mais desenvolvidos, proporcionando maior diversificação da matriz energética neste setor e maximizar a produção de óleo vegetal para alimentação humana.

Nos últimos tempos, pesquisadores têm investido em novas tecnologias, tornando o mercado agrícola e também a cultura da canola, um foco de investimento em óleo vegetal. Essa evolução veio também acompanhada por novas e mais avançadas tecnologias em proteção a sementes e grãos por meio de pesquisas atuais.

Devido aos escassos investimentos em pesquisa no Brasil, ainda existem dificuldades tecnológicas para a expansão do cultivo dessa oleaginosa em nosso país. Assim, há necessidade de identificar épocas de semeadura para regiões com maior altitude, de ajuste de manejo, de aperfeiçoamento de uso de fertilizantes, de tecnologias que visem a redução de perdas na colheita e adequação de procedimentos de pós-colheita na secagem e armazenagem (TOMM, 2007b).

Durante o armazenamento, o aumento da umidade relativa do ar e da temperatura do ambiente do armazenamento pode provocar aceleração das atividades respiratórias da semente ou grãos e de fungos e/ou insetos que a acompanham

(PAOLINELLI & FALLIERI, 1982). Portanto, o método de secagem, o teor de água e a espessura do produto influenciam fortemente na qualidade final, as operações de secagem devem ser realizadas de acordo com a economia, a qualidade final desejada do produto, a aceitabilidade e preferências do consumidor (YILMAZ, 2017).

Os cereais, por exemplo, com alto conteúdo de amido, possuem alto potencial de armazenamento. Por outro lado, sementes e grãos, com alto teor de óleo têm tendência a maior risco de deterioração, pelas reações envolvendo a peroxidação de lipídeos (BLACK et al., 2006).

Os estudos da cinética de secagem têm despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais diferentes produtos. Diante desta realidade, constata-se que o estudo do processo de secagem fornece informações relativas ao comportamento do fenômeno de transferência de calor e massa entre o material biológico e o elemento de secagem, normalmente o ar atmosférico, aquecido ou não. Essas informações são fundamentais para a elaboração de projeto, e operação e simulação de sistemas de secagem e secadores (CORRÊA et al., 2003)

É importante ressaltar que para evitar deterioração das sementes armazenadas, principalmente em regiões tropicais, é necessário conhecer como a temperatura se relaciona com a umidade relativa do ar. Para isso, o equilíbrio higroscópico deve ser conhecido sob diversas condições ambientais.

Uma forma de se conhecer o comportamento higroscópico dos produtos é por meio das isotermas de sorção que auxiliam na determinação do tempo de secagem, caracterização do produto, além da determinação de sua vida útil e do tipo de embalagem adequada para o armazenamento (ALEXANDRE et al., 2007).

Na literatura, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever a cinética de secagem em camada fina para produtos agrícolas, como por exemplo o crambe (FARIA et al., 2012). Esses modelos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem (RESENDE et al., 2008).

Apesar de várias teorias terem sido propostas para prever o comportamento da secagem de sementes e grãos, na maioria das vezes as relações semiempíricas e empíricas têm se mostrado como melhores opções para prever o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER et al., 1992).

1.1 Cultura da Canola

A canola faz parte da família Brassicaceae, gênero *Brassica* (DIAS 1992). O nome canola é derivado da sigla Canadian Oil Low Acid, que significa "azeite canadense de baixo teor ácido" as sementes foram obtidas por modificação genética das espécies *Brassica napus* e *Brassica rapa* (campestris). As cultivares de canola se caracterizam por conter baixo teor de ácido erúcido e glucosinolatos, e são diferentes em física, química e propriedades nutricionais em relação ao óleo de colza (PRZYBYLSKI et al., 2005).



Figura 1- Planta e sementes de *Brassica napus*, Kristen (2013).

Considerava-se canola (*Brassica napus* L. var oleífera), as sementes que apresentava teores de ácido erúcido, menor que 2% e menos que 30 μmol de glucosinalatos (Canola Council of Canada, 1999). A cultura destaca-se como a terceira oleaginosa mais cultivada no mundo. Na União Europeia, encontram-se os maiores produtores e consumidores mundiais de canola e a China é considerada o segundo maior país produtor e consumidor da cultura (USDA, 2016).

No Brasil, ainda existem dificuldades tecnológicas na expansão do cultivo, tal como a identificação de melhores épocas de semeadura e manejo para cada região (TOMM et al., 2009). Entretanto, a expansão da produção pode ser embasada no cultivo da canola em regiões tropicais (TOMM et al., 2004). A produção de canola, tipicamente

produzida em regiões de clima temperado entre as latitudes de 35 e 55°, vem sendo estudada em diversas regiões de baixa latitude, com o objetivo de “tropicalizar” a cultura da canola e ampliar sua produção.

Em virtude do seu tamanho reduzido e da pequena quantidade de sementes utilizada por hectare, Póla & Barros (1994) destacam que informações sobre a qualidade das sementes de canola são extremamente úteis para obtenção do estande desejado. Por esta razão, a OCEPAR (1995), recomenda que as informações obtidas no teste de germinação das sementes de canola devam ser complementadas com informações sobre o vigor das sementes, obtidas tanto por meio da avaliação da emergência das plântulas em campo ou em areia.

A canola é adaptada para as regiões temperadas que possibilitam a germinação e crescimento e permitem o cultivo em regiões mais frias e de maiores altitudes (ESKIN et al., 2006). No Brasil é produzida nas regiões do Centro-Oeste e Sul, a partir de genótipos menos sensíveis a temperatura devido a adaptação realizadas na cultura (CONAB, 2011). Em Goiás, o cultivo comercial de canola teve início no ano de 2004 e no sudoeste Goiano a cultura constitui alternativa para diversificação e geração de renda no período de segunda safra, também chamada "safrinha" (TOMM, 2005).

As sementes de canola produzidos no Brasil possuem de 24 a 27% de proteína e em média 38% de óleo que é utilizado para consumo humano ou para produção de biodiesel. Também se extrai o farelo dos grãos que possui de 34 a 38% de proteínas, sendo excelente suplemento proteico na formulação de rações para bovinos, suínos, ovinos e aves (EMBRAPA, 2011).

Os programas de reprodução da canola abordam modificações genéticas desde a década de 1980 visando o aumento do rendimento, teor de óleo e proteína, uniformidade no amadurecimento das sementes, resistência às doenças e pragas, além do desenvolvimento de cultivares com baixo teor de ácido linolênico e alto teor de oléico (ESKIN et al., 2006).

1.2 Armazenagem de produtos agrícolas

Para atender a logística de produção e comercialização de alimentos, a armazenagem dos produtos agrícolas é uma excelente alternativa. Desta forma, informações a respeito do comportamento das sementes ou grãos diante das prováveis

condições climáticas que ocorrem durante o armazenamento, podem auxiliar na tomada de decisão sobre o armazenamento do produto com base na relação custo-benefício, decorrente de possíveis perdas de qualidade na estocagem (SMANIOTTO et al., 2014). Como grande parte da produção de grãos é armazenada durante determinado período, o Brasil tem enfrentado problemas nesta área em decorrência da capacidade estática limitada (MAIA et al., 2013) e das práticas inadequadas realizadas durante o armazenamento (LIMA JÚNIOR et al., 2012).

As boas práticas de armazenamento de sementes e grãos podem ser adotadas, em todas as escalas de produção agrícola, desde pequenos a grandes produtores, com objetivo de proporcionar a qualidade final do produto agrícola, bem como a saúde e a segurança do trabalhador rural e dos consumidores (PIMENTEL et al., 2011).

É importante ressaltar que durante o armazenamento não é possível melhorar a qualidade, e no máximo pode-se manter. Logo, somente boas práticas de armazenamento conservam a qualidade física e fisiológica dos produtos (BAUDET & VILELA, 2000). Para Cardoso et al. (2012), o processo de deterioração é inevitável, mas pode ser retardado dependendo das condições de armazenamento e das características da semente ou grão. De acordo com Toledo et al. (2009) a redução na qualidade das sementes é, em geral, traduzida pelo decréscimo na percentagem de germinação, aumento de plântulas anormais e redução no vigor das plântulas.

O uso de sementes de baixa qualidade, a escolha de variedades inapropriadas, o preparo inadequado do solo e a semeadura fora do tempo são fatores que podem acarretar perdas nas lavouras, tanto na fase de pré-colheita quanto na colheita (IBGE, 2003).

O armazenamento adequado deve ser realizado tão logo quanto possível para preservar a qualidade da semente desde a colheita até a semeadura na safra seguinte. Contudo, o armazenamento das sementes inicia algum tempo antes que seja realizada a colheita, ou seja, a partir do momento em que elas atingem o ponto de maturidade fisiológica. Nesse estágio, porém, as sementes ainda apresentam alta umidade e por isso permanecem mais tempo no campo, até que possam ser colhidas. Dessa forma, o principal objetivo do armazenamento é a manutenção da qualidade fisiológica das sementes reduzindo ao mínimo a deterioração (BAUDET & VILLELA, 2012).

1.3 Cinética de Secagem

Existem muitas maneiras de se realizar a secagem de produtos agrícolas, desde a exposição ao ar livre ao uso de equipamentos que realizam a retirada do excesso de água de forma rápida e eficiente. Esse procedimento deve ser feito de modo a preservar a aparência, a qualidade nutritiva dos grãos e a viabilidade como semente (SILVA et al., 2008).

O componente principal da maioria dos produtos agrícolas é a água, que apresenta ampla influência em suas propriedades físicas e químicas. Segundo Okada et al. (2002), o processo de secagem ocorre a partir da remoção de água da parte sólida, por evaporação, por meio da utilização de temperatura inferior a temperatura de ebulição do líquido. Operacionalmente, segundo Andrade et al. (2008), o processo de secagem se desenvolve por meio da passagem de um fluxo de ar, preferencialmente aquecido, pelo produto, induzindo a formação de um gradiente de pressão de vapor entre a superfície do produto e o ambiente, e, por conseguinte, entre a superfície do produto e seu interior. Para a verificação do comportamento do produto ao longo do tempo, durante a secagem, Corrêa et al. (2001) e Andrade et al. (2008) indicam a análise da taxa de redução de água, que representa a variação da massa de água em relação a massa seca e a variação do tempo de processo.

As características específicas de cada produto, associadas às propriedades do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adotado, determinam diversas condições de secagem. Entretanto, a transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto é fenômeno comum a qualquer condição de secagem. O processo de secagem, baseado na transferência de calor e de massa, pode ser dividido em três períodos: 0) início da secagem, 1) taxa constante de secagem e 2) taxa de secagem é decrescente, conforme verificado na Figura 2 (BROD et al., 1999)

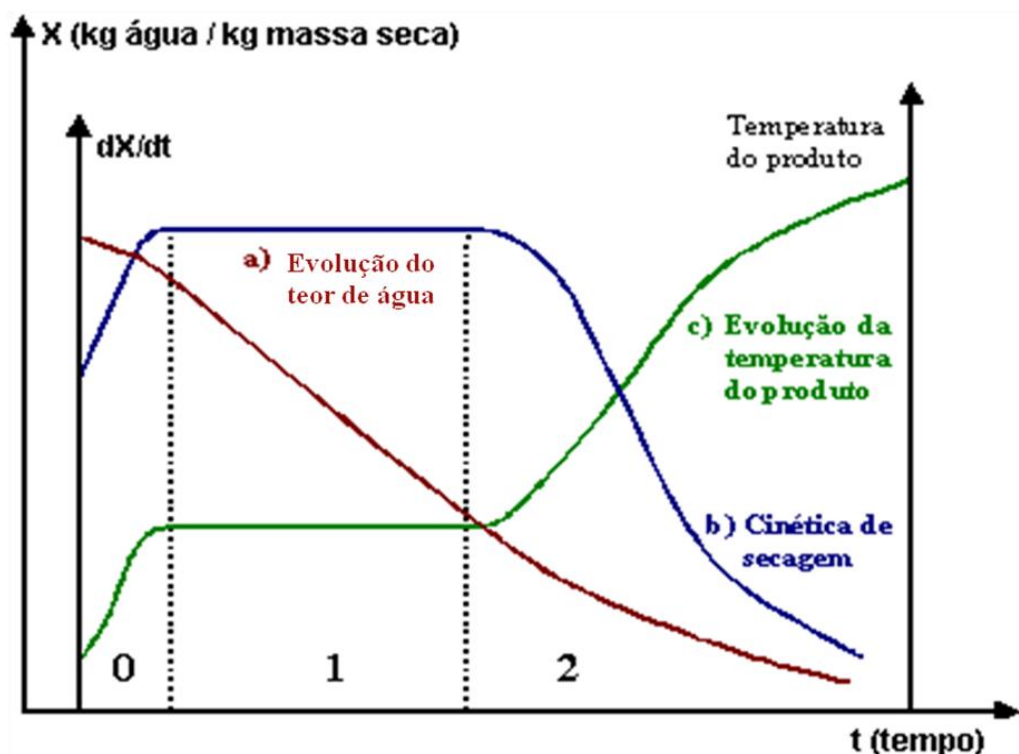


Figura 2 - Curvas típicas de secagens.

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem, teor de água do produto em base seca (X), em relação ao tempo de secagem (t), curva gerada a partir das pesagens do produto durante a secagem numa determinada condição de secagem. A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto, variação do teor de água do produto por tempo, dX/dt em relação ao tempo (t). A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto (T) em relação a evolução do tempo t) (PARK et al., 2007).

A secagem de produtos é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade de alguns materiais agrícolas, considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (RESENDE et al., 2008).

A maioria dos produtos agrícolas é colhida com teores de água superiores ao recomendado para uma armazenagem segura. Assim, a secagem tem como objetivo possibilitar a antecipação da colheita, a fim de minimizar os efeitos prejudiciais das condições climáticas adversas, danos mecânicos, ataque de fungos e insetos,

maximizando a massa específica e a qualidade das sementes ou grãos colhidos (GARCIA et al., 2004).

O estudo do processo de secagem fornece informações relativas ao comportamento do fenômeno de transferência de calor e massa entre o material biológico e o elemento de secagem, normalmente o ar atmosférico, aquecido ou não; essas informações são fundamentais para a elaboração de projeto, operação e simulação de sistemas de secagem e secadores (CORRÊA et al., 2003).

O estudo de sistemas de secagem, seu dimensionamento, otimização e a determinação da viabilidade de sua aplicação comercial, podem ser feitos por meio de simulação matemática, cujo princípio se fundamenta na secagem de camadas delgadas do produto, utilizando modelo matemático que representa satisfatoriamente a perda de água (RESENDE et al., 2007). As curvas de secagem em camada delgada variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores. Neste sentido, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas (RESENDE et al., 2010).

1.4 Higroscopicidade

Todos os produtos agrícolas têm a capacidade de ceder ou absorver água do ambiente, tendendo a manter constantemente a relação de equilíbrio entre seu teor de água e as condições do ar ambiente. O teor de água de equilíbrio é alcançado quando a pressão parcial de vapor de água nas sementes se iguala ao do ar que o envolve (CORRÊA et al., 2005).

É possível estabelecer uma relação estreita entre o teor de água livre no produto e sua conservação. O teor de água livre é expresso pela atividade de água (a_w) que é a relação entre a pressão de vapor de água em equilíbrio sobre o produto, e a pressão de vapor de água pura, na mesma temperatura (MOHSENIN, 1986). A atividade de água também pode ser definida como a umidade relativa em equilíbrio com o produto em uma determinada temperatura.

O estudo da curva de sorção, que relaciona esta atividade de água com a umidade relativa de equilíbrio, fornece informações relevantes para adequação dos parâmetros de secagem. A determinação da atividade de água é uma das medidas mais importantes no processamento e na análise dos materiais biológicos, pela sua

importância referente a qualidade e estabilidade. A afinidade existente entre a água e os outros componentes de um produto define sua higroscopicidade que é uma característica fundamental para influenciar os processos de manuseio, armazenagem e consumo de materiais biológicos (TEXEIRA NETO et al., 1993).

Durante a secagem, as isotermas de equilíbrio higroscópico do produto apresentam grande importância, por ter como finalidade estabelecer se o produto tende a ganhar ou a perder água sob determinadas condições de temperatura e umidade relativa do ar (ANSELMO et al., 2006).

O comportamento higroscópico de diversos produtos agrícolas pode ser determinado utilizando modelos diferenciados para expressar o teor de água de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar. Entretanto, para o estabelecimento de isotermas que representam essa relação de equilíbrio são utilizados modelos matemáticos empíricos, uma vez que nenhum modelo teórico desenvolvido tem sido capaz de prever com precisão o teor de água de equilíbrio para uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar (RESENDE et al., 2006).

1.5 Modelos Matemáticos

No estudo de sistemas de secagem, desenvolvimento, aperfeiçoamento de equipamentos, dimensionamento, otimização e determinação da viabilidade da aplicação comercial, são de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água; em referência a simulação utilizam modelos matemáticos que representam satisfatoriamente sua perda de água durante a secagem (MENEGHETTI et al., 2012).

Na literatura, encontram-se vários métodos propostos para se analisar a secagem em camada fina de produtos higroscópicos: os teóricos, os semiteóricos e os empíricos. Embora várias teorias tenham sido propostas para prever o comportamento da secagem de grãos e de sementes; na maioria das vezes, as relações semiteóricas e empíricas têm sido as melhores opções para descrever o processo de secagem apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER et al., 1992).

De acordo com Midilli et al. (2002), o modelo teórico, considera apenas a resistência interna à transferência de calor e água entre o produto e o ar quente; os

modelos semiteóricos e os empíricos, que consideram somente a resistência externa à temperatura e a umidade relativa do ar de secagem (Midilli et al., 2002; Panchariya et al., 2002).

Isquierdo (2011), afirma também que os métodos teóricos normalmente consideram, além das condições externas sob as quais ocorreu a operação, como também os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos.

Uma vez que os modelos baseados na segunda Lei de Fick, em que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água, não são rigorosamente representativos dos diversos mecanismos que prevalecem no transporte de água em produtos agrícolas, e a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem (temperatura e velocidade do ar), ou seja, não é intrínseca ao material, convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva (ROCA et al., 2008).

Os modelos de cálculo da cinética de secagem são aplicados de modo diferente, dependendo do período considerado. Na literatura vários modelos foram propostos para analisar a secagem de produtos higroscópicos (MARTINAZZO et al., 2007).

Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se modelo matemático que representa satisfatoriamente a perda de umidade do produto durante o período de secagem (AFONSO JUNIOR & CORRÊA, 1999).

Os modelos, além de permitir a avaliação dos mecanismos e das propriedades físicas de transporte de massa durante o processo, são importantes na seleção e desenvolvimento de equipamentos, e no cálculo dos custos operacionais (DIONELLO et al., 2009).

1.6 Comportamento mecânico das sementes

O conhecimento de todo o processo de produção para a obtenção de grãos ou sementes com alta qualidade torna-se indispensável, uma vez que rachaduras e quebras ocorrem nos grãos e sementes se os esforços, aos quais são submetidos, excedem a força de resistência do material (FERNANDES et al., 2014).

Desde a colheita até o destino final, o grão ou a semente são submetidos aos vários processos que envolvem uma série de tratamentos mecânicos. O comportamento

mecânico de um material é importante, principalmente na especificação de cargas que ele pode suportar de maneira segura, ou de cargas que determinadas máquinas deverão exercer sobre o produto, para se obter um resultado específico (COUTO et al., 2002).

O estudo das características mecânicas dos produtos agrícolas é importante para que os equipamentos possam ser desenvolvidos para atingir a máxima eficiência, sem comprometer a qualidade final do produto. As trincas e quebras ocorrem nos grãos e sementes quando os esforços, aos quais são submetidos, excedem a força de resistência do material (LIU et al., 1990).

Diversos fatores afetam as propriedades mecânicas dos produtos agrícolas, destacando-se entre eles as condições de secagem, o teor de água, o tipo de força e a região do grão ou da semente, na qual esse tipo de força é aplicado (ZHANG et al., 1989).

Segundo Couto et al. (2002), o experimento mais simples e comum para se medir a resposta mecânica de um material é o teste de compressão (ou tração) uniaxial, através do qual uma força, gradualmente crescente é aplicada (pela placa compressor) no material, enquanto os dados de força-deformação são registrados durante a compressão.

A partir da curva de “força-deformação”, obtida a partir do teste de compressão, podem-se obter características que caracterizam a resposta do material quando submetido a uma carga (RIBEIRO et al., 2007).

1.7 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**, v.3, n.3, p.349-353, 1999.

ALEXANDRE, H.V.; FIGUEIREDO, R.M.F.; QUEIROZ, A.J.M. Moisture adsorption isotherms of red brazilian cherry powder. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 7, p. 11-20, 2007.

ANDRADE, E.T.; BORÉM F.M. **Modelagem Matemática e Simulação Aplicados na Secagem do Café-Lavras**- Ed. UFLA. p. 303-347.2008.

ANSELMO, G.C.S.; MATA, M.E.R.M.C.; ARRUDA, P.C.; SOUSA, M.C.

Determinação da higroscopicidade do cajá em pó por meio da secagem por atomização.

Revista de Biologia e Ciências da Terra, v.6, n.2, P.58-65, 2006.

BAUDET, L.; VILLELA, F.A. Armazenamento de Sementes. In: Sementes: Fundamentos Científicos e Tecnológicos. Ed. PESKE, S.T.; VILLELA, F.A.; MENEGHELLO, G. E. Pelotas: UFPEL, 2012, 573p.

BAUDET, L.; VILLELA, F.A. **Armazenamento Garantindo o Futuro**. SEED NEWS Pelotas: Editora Becker e Peske Ltda, 2000, p.28-32.

BLACK, M.; BEWLEY, J.D.; HALMER, P. The Encyclopedia of Seeds – Science, Technology and Uses. CABI International 2006. p. 137 e 554.

BROD, F.P.R., ALONSO, L.F.T., PARK, K.J. Secagem de produtos agrícolas. **XI SEMEAGRI – Semana de Engenharia Agrícola da Unicamp**. Campinas: Agrológica – Empresa Júnior de Eng. Agrícola. 1999, 122 p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: The AVI Van Nostrand Reinhold, 1992. 450 p.

CANOLA COUNCIL OF CANADA. **Canola**. Winnipeg, (1999) 23 p. Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/bp/p_bp26.pdf, Acesso em 18 de setembro de 2018.

CARDOSO, R.B.; BINOTTI, F.F.S.; CARDOSO, E.D. Potencial fisiológico de sementes de crambe em função de embalagens e armazenamento. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, p.272-278, 2012.

CONAB - **Companhia Nacional de Abastecimento**. **Canola**. Brasília, 2011.

Disponível

em:http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_08_03_11_27_46_canolajulho2011..pdf. Acesso em 05 de julho de 2018.

CORRÊA, P.C.; ARAÚJO, E.F.; AFONSO JÚNIOR, P.C. Determinação dos parâmetros de secagem em camada delgada de sementes de milho doce (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.2, n.2, p.110-119, 2003.

CORRÊA, P.C.; MACHADO, P.F.; ANDRADE, E.T. Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca. **Ciência e Agrotecnologia**, v.25, n.1, p.134-142. 2001.

CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D.M. Isotermas de sorção das espigas de milho: obtenção e modelagem. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.4, n.1, p.126-134, 2005.

COUTO, S.M.; BATISTA, C.S.; PEIXOTO, A.B.; DEVILLA, I.A. Comportamento mecânico de frutos de café: módulo de deformidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.285-294, 2002.

DIAS, C.A. Canola/Colza: **alternativa de inverno com perspectiva de produção de óleo comestível e energético**. Pelotas: Embrapa – CPATB, 1992, p.46.

DIONELLO, R.G. BERBET, P.A.; MOLINA, M.A.B.; PEREIRA, R.C.; VIANA, A.P.; CARLESSO, V.O. Secagem de fatias de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação: cinética e avaliação de modelos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 01, p. 232-240, 2009.

EMBRAPA TRIGO - **EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA**

AGROPECUÁRIA. Disponível em.

<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/canola/definicao.htm>, Acesso em 04 de maio de 2018.

ESKIN, N.A.M.; DONALD, B.E.; PRZYBYLSKI, R.; MALCOLMSON, L.J.; SCARTH, R.; MAG, T.; WARD, K.; ADOLPH, D. Aceite de canola: Historia y desarrollo. **Aceites & Grasas**, v.4, n.65, p.594-604, 2006.

ESKIN, N.A.M.; DONALD, B.E.; PRZYBYLSKI, R.; MALCOLMSON, L.J.; SCARTH, R.; MAG, T.; WARD, K.; ADOLPH, D. Aceite de canola: Historia y desarrollo. **Aceites & Grasas**, v.4, n.65, p.594-604, 2006.

FARIA, R.Q.; TEIXEIRA, I.R.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 57-583, 2012.

FERNANDES, L.S.; CORRÊA, P.C.; DINIZ, M.D.M.S.; LEITE, D.M.; VASCONCELLOS, D.S.L. Influência do teor de água nas propriedades mecânicas dos grãos de trigo submetidos à compressão. **Bioscience Journal**, v.30, n.1, p.219-223, 2014.

GARCIA D.C.; BARROS, A.C.S.A.; PESKE, S.T.; MENEZES, N.L. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, v.34, n.2, p.603-608, 2004.

IBGE. **Índices de Perdas do Plantio á Pré-Colheita dos Principais Grãos Cultivados no País**, 1996 -2002. 2003, p.1-4.

ISQUIERDO, E.P. **Cinética de secagem de café natural e suas relações com a qualidade para diferentes temperaturas e umidades relativas do ar**. 2011. 157f. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

LIMA JÚNIOR, A.F.; OLIVEIRA, I.P.; ROSA, S.R.A.; SILVA, A.J.S.; MORAIS, M.M. Controle De Pragas De Grãos Armazenados: Uso e Aplicação de Fosfetos. **Revista Faculdade Montes Belos**, v.5, n.4, p.180-184, 2012.

LIU, M.; HAGHIGHI, K.; STROSHINE, R.L.; TING, E.C. Mechanical properties of soybean cotyledon and failure strength of soybean kernel. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**. v.33, 1990, p.559-565.

MAIA, G.B.S.; PINTO, A.R.; MARQUES, C.Y.T.; LYRA, D.D.; ROITMAN, F.B. Panorama da Armazenagem de Produtos Agrícolas no Brasil. **Revista do BNDES**, v. 40, p.161-194, 2013.

MARTINAZZO, A.P.; CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MELO, E.C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.1, p.301-306, 2007.

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

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, v.20, p.1503-1513, 2002.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plants and animals materials**. 2. ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1986, p.841.

ORGANIZAÇÃO DAS COOPERATIVAS DO ESTADO DO PARANÁ - OCEPAR. **Recomendações técnicas para a cultura do trigo no Estado do Paraná**. Cascavel: OCEPAR, 1995. 115p. Boletim Técnico, 37.

OKADA, M. YOSHIDA, H.; AKAZAWA, R.; NEGISHI, M.; MORI, K.. **Fundamentos sobre secagem de sólidos**. In: AGUIRRE, J. M, GASPARINO FILHO, J.(Ed.). Desidratação de frutas e hortaliças. Campinas: ITAL. p.1.1-1.10. 2002.

PAOLINELLI, G.P.; FALLIERI, J. Qualidade de sementes de algodão em Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v.8, n.92, p.81-85, 1982.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. **Apostila de conceitos de processo e equipamentos de secagem**, Campinas, CT&EA – Centro de Tecnologia e Engenharia Agroindustrial, 2007.

PIMENTEL, M.A.G; QUEIROZ, V.A.V.; MENDES, S.M.; COSTA, R.V.; ALBERNAZ, W.M. Recomendações de boas práticas de armazenamento de milho em espiga para agricultura familiar. **Circular Técnica 161**. Sete Lagoas, p.1-11, 2011.

PÓLA, J.M.; BARROS, A.S.R. **Avaliação da qualidade fisiológica de sementes de canola**. Londrina: IAPAR, 1994, p20.

PRZYBYLSKI, R.; MAG, T.; ESKIN, N.A.M.; MCDONALD, B.E. Canola Oil. **In: SHAHIDI, Fereidoon et al. Bailey's Industrial Oil and Fat Products**. 6. ed. Wiley: Hoboken, v.2.n.2, p. 61-122, 2005.

RESENDE, O.; ARCANJO, R.V.; SIQUEIRA, V.C.; RODRIGUES, S.; KESTER, A.N.; LIMA DE, P.P. Influência do tipo de pavimento na secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiros de concreto e chão batido. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.9, n.2, p.171-178, 2007.

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**, v.10, n.1 p.17-28, 2008.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; RIBEIRO, D.M. Isotermas e Calor Isostérico de Sorção do Feijão. **Ciências e Tecnologia de Alimentos**, v.26, n.3, p.626-631, 2006.

RESENDE, O.; RODRIGUES, S.; SIQUEIRA, V.C.; ARCANJO, R.V. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. **Acta Amazônica**, v. 40, p. 247-256, 2010.

RIBEIRO, D. M.; CORRÊA, P. C.; FURTADO, B. F.; GONELI, A. L. D.; RESENDE, O. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, p.493-500, 2007.

ROCA, E.; GUILLARD, V.; BROYART, B.; GUILBERT, S.; GONTARD, N. Effective moisture diffusivity modeling food structure and hygroscopicity. **Food Chemistry**, v.106, n.4, p.1428-1437,2008.

SILVA, W.P.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; SILVA, C.D.P.S.; GUEDES, M.A.; LIMA, A.G.B. Determinação da difusividade e da energia de ativação para feijão macassar (*Vigna unguiculata*(L.) Walp.), variedade sempre-verde, com base no comportamento da secagem. **Engenharia Agrícola**, v.28, n.2, p.325-333, 2008.

SMANIOTTO, T.A.S.; RESENDE, O.; MARÇAL, K.A.F.; OLIVEIRA, D.E.C.; SIMON, G.A. Qualidade fisiológica das sementes de soja armazenadas em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.4, p.446–453, 2014.

TEXEIRA NETO, R.O.; QUAST, D.G. Isotermas de adsorção de umidade em alimentos. **Coletânea do Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL)**, Campinas, v.8,n n.1, p.141-197, 1993.

THOMAS, P. **Canola grower's manual**. Winnipeg: Canola Council of Canada, 2013. Disponível em: <<http://www.canolacouncil.org/crop-production/canola-grower's-manual-contents>>. Acesso em: 30 julho de 2018.

TOLEDO, M.Z.; FONSECA, N.R.; CÉSAR, M.L.; SORATTO, R.P.; CAVARIANI, C.; CRUSCIOL, C.A.C. Qualidade fisiológica e armazenamento de sementes de feijão em função da aplicação tardia de nitrogênio em cobertura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.39, n.2, p.124-133, 2009.

TOMM, G.O. **Indicativos tecnológicos para produção de canola no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2007. 32 p. (Embrapa Trigo. Sistema de produção online, 3). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/canola/p_sp03_2007.pdf>. Acesso em: 20 março 2018.

TOMM, G.O.; FERREIRA, P.E.P.; AGUIAR, J.L.P. de.; CASTRO, A.M.G. de; LIMA, S.M.V.; DE MORI, C. **Panorama atual e indicações para aumento de eficiência da produção de canola no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. 34 p. (Embrapa Trigo. Documentos online, 118). Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPT-2010/40777/1/p-do118.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2018.

TOMM, G.O. **Situação em 2005 e perspectivas da cultura de canola no Brasil e em países vizinhos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2005. 21 p. html. (Embrapa Trigo. Boletim de pesquisa e desenvolvimento online, 26). Disponível em: Acesso em: 16 março 2018.

TOMM, G. O. **Tecnologia para cultivo de canola no sudoeste de Goiás**. [Itumbiara]: Caramuru Alimentos Ltda., 2004. 34 p. disponível em: Acesso 19 de setembro de 2018. http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do118_8.htm

USDA – United States Department of Agriculture. **Economics, Statistics and Market Information System**, 2016. Disponível em: <<http://usda.mannlib.cornell.edu/MannUsda/viewDocumentInfo.do?documentID=1490>>. Acesso em 19 de outubro de 2018.

ZHANG, Q.; LI, Y; PURI, V. M.; MANBECK, H. B. Physical properties effect on stress strain behavior of wheat en masse – Part II. Constitutive elastoplastic parameter dependence on initial bulk density and moisture content. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.32, n.1, p.203-209, 1989.

YILMAZ, F.M.; KESEKAY A, S. Y.; VARDIN, H.; KARAASLAN, M. , 2017. The effects of drying conditions on moisture transfer and quality of pomegranate fruit leather (pestil). **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.16, n.1, p.33-40, 2017.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Estudar a higroscopicidade e as propriedades mecânicas, bem como avaliar a qualidade fisiológica das sementes de canola (*Brassica napus* L. var. *Oleifera*) em função da secagem e o armazenamento.

2.2 Específicos

- Avaliar o processo de secagem de sementes de canola para diversas condições de ar e ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais da secagem em função do teor de água;

- Verificar a qualidade das sementes de canola, em função da temperatura de secagem e tempo de armazenamento.

- Verificar o efeito do tempo e das condições de armazenamento na qualidade das sementes de canola;

- Obter as isotermas de sorção e estudar o equilíbrio higroscópico ajustando modelos matemáticos aos dados experimentais;

- Verificar a influência do teor de água das sementes de canola nos valores da força máxima de compressão para deformações fixas e determinar o módulo proporcional de deformidade das sementes submetidas à compressão em diferentes posições;

- Determinar a força de ruptura necessária para o rompimento do tegumento das sementes de canola.

CAPÍTULO I

Cinética da secagem de sementes de canola

RESUMO – Objetivou-se com este trabalho estudar a cinética de secagem de sementes de canola, verificar o ajuste dos modelos matemáticos e obter o coeficiente de difusão efetivo. Foram utilizadas sementes de canola com teor de água inicial de 26,76 (%b.u.) submetidos a secagem em estufa com ventilação forçada nas diferentes temperaturas de 40; 60; 80 e 100 °C e umidades relativas de 37,15; 16,93; 8,35; 4,41 e 2,47%, respectivamente. As amostras foram secas em bandejas sem perfurações, contendo, aproximadamente 77 g, em três repetições. Para a determinação das curvas de secagem e ajustes dos modelos matemáticos, foi estabelecido o teor de água final de 0,080±0,004 (b.s.). Determinou-se as razões de teor de água do produto; para a representação da cinética de secagem utilizaram-se modelos frequentemente usados para descrever a secagem de produtos agrícolas. Os modelos foram selecionados considerando o erro médio estimado, *Qui*-quadrado, Coeficientes de determinação, erro médio relativo, o critério de Akaike (AIC) e o critério de informação Bayesiano (BIC). O tempo de secagem reduz com o aumento da temperatura, sendo o modelo de Page selecionado para representar a cinética de secagem das sementes de canola. O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura, sendo descrito pela equação de Arrhenius, com energia de ativação de 33,94 kJ mol⁻¹.

PALAVRAS-CHAVES: *Brassica napus L.* e *Brassica rapa L.*, temperatura, modelos matemáticos.

ABSTRACT - The objective of this study was to study the canola seeds drying kinetics, to verify the mathematical models fit and to obtain the effective diffusion coefficient. Canola seeds with initial water content of 26.76 (%w.b.), were submitted to oven drying with forced ventilation at different temperatures of 40; 60; 80 and 100 °C and relative humidity of 37.15; 16.93; 8.35; 4.41 and 2.47%, respectively. The samples were dried in unperforated trays containing approximately 77 g in three replicates. For drying curves determination and adjustments of the mathematical models, the final moisture

content of 0.080 ± 0.004 (d.b.) was established. The water content ratios of the product were determined; to represent the drying kinetics, models often used to describe the agricultural products drying were used. The models were selected considering the estimated mean error, Chi-square, Determination coefficients, relative mean error, Akaike criterion (AIC) and Bayesian information criterion (BIC). The drying time reduces with increasing temperature, and the Page model is selected to represent the canola seeds drying kinetics. The effective diffusion coefficient increases with the temperature rise, being described by the Arrhenius equation, with activation energy of $33.94 \text{ kJ mol}^{-1}$.

KEYWORDS: *Brassica napus L.* and *Brassica rapa L.*, temperature, mathematical models.

INTRODUÇÃO

A canola é uma oleaginosa pertencente à família das Brassicaceae e ao gênero *Brassica*. As sementes de canola produzidas atualmente no Brasil possuem em torno de 27% de proteína e 38% de lipídeos (TOMM, 2007a). A canola vem-se destacando como importante espécie alternativa para produção de sementes e grãos no período de estação fria do ano na região sul do Brasil (KRÜGER et al., 2011). Porém, a canola ainda necessita de pesquisas para identificar épocas de semeadura para regiões com maior altitude, de ajuste de manejo, de aperfeiçoamento de uso de fertilizantes, de tecnologias que visem a redução de perdas na colheita e adequação de procedimentos de pós-colheita na secagem e armazenagem (TOMM, 2007b).

O método de secagem, as condições e a espessura da massa das sementes influenciam fortemente na qualidade final. As operações de secagem devem ser realizadas de acordo com a economia, a qualidade final desejada do produto, a aceitabilidade e preferências do consumidor (YILMAZ, 2017). Conforme Zonta et al. (2011) as temperaturas das quais as sementes podem ser expostas dependem diretamente do teor de água inicial e\ou do tempo de exposição à secagem.

Os modelos matemáticos permitem avaliar e prever o comportamento de diversos materiais durante o processo de secagem, sendo descrito por meio de equações teóricas, semiteóricas e empíricas. De acordo com Corrêa et al. (2011), o ajuste de modelos matemáticos aos dados experimentais é essencial para prever e simular o comportamento dos produtos que são submetidos a um determinado processo. Portanto,

o uso de modelos matemáticos para a secagem contribui para a execução dos projetos e dimensionamento dos equipamentos.

Existem diversos modelos empíricos para descrever o processo de secagem. Já os modelos semiteóricos se baseiam na analogia com a Lei de Newton para o resfriamento, aplicados à transferência de massa e calor da superfície para o ambiente (FIORENTIN et al., 2012). Em conformidade com os autores, quando o processo é controlado pela resistência no interior do sólido ao transporte de água, é comum a aplicação da equação de difusão baseada na segunda Lei de Fick, que relaciona a umidade média e o tempo, sendo que o parâmetro ajustado é a difusividade efetiva, aplicáveis aos modelos teóricos e empíricos.

Nesse contexto, objetivou-se neste trabalho estudar a cinética de secagem de sementes de canola, verificar o ajuste dos modelos matemáticos e obter o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação para o processo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde e Campus Iporá, GO. Foram utilizadas sementes de canola híbrido Hyola 430 com teor de água inicial de 26,76 (% b.u.). A secagem foi realizada em estufa com ventilação forçada em diferentes condições controladas de temperatura, 40; 60; 80 e 100 °C e umidades relativas de 37,15; 16,93; 8,35; 4,41 e 2,47%, respectivamente. As sementes foram secas em bandejas sem perfurações contendo, aproximadamente, 77 g de produto, perfazendo em torno de 2 cm de espessura, em delineamento inteiramente ao acaso, em três repetições.

Para a determinação das curvas de secagem e ajustes dos modelos, foi estabelecido o teor de água final de $0,080 \pm 0,004$ (b.s.). Os teores de água foram determinados em estufa a 105 ± 3 °C, durante 24 h (BRASIL, 2009).

Para a obtenção do equilíbrio higroscópico da canola foram utilizadas três repetições contendo 10 g, mantidas nas específicas condições de secagem e pesadas periodicamente até a massa permanecer constante. As razões de teor de água do produto foram determinadas pela Eq.1:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

em que:

RX - razão de teor de água, adimensional

X - teor de água do produto em determinado tempo de secagem (decimal b.s.)

X_i - teor de água inicial do produto (decimal b.s.)

X_e - teor de água de equilíbrio do produto (decimal b.s.)

Para representação da cinética de secagem das sementes de canola foram utilizados os modelos frequentemente usados para descrever a secagem de produtos agrícolas conforme descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos agrícolas.

Designação do modelo	Modelo	
$RX = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	Wang e Singh	(2)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k_1 \cdot t)$	Verma	(3)
$RX = \exp\left(\frac{-a - (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0.5}}{2 \cdot b}\right)$	Thompson	(4)
$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	Page	(5)
$RX = \exp(-k \cdot t)$	Newton	(6)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	Midilli	(7)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	Logarítmico	(8)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis	(9)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$	Exponencial de dois termos	(10)
$RX = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	Dois termos	(11)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	Aproximação da difusão	(12)

em que:

t: tempo de secagem, h

k, k₀, k₁: constantes de secagem, h⁻¹

a, b, c, n: coeficientes dos modelos

Os modelos matemáticos foram ajustados por meio de análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, e foram selecionados considerando o erro médio estimado (SE), o teste de qui-quadrado (χ^2), o erro médio relativo (P), a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), foi considerado o critério de Akaike (AIC) e o critério de informação Bayesiana de Schwarz (BIC).

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (13)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR} \quad (14)$$

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (15)$$

em que:

Y - valor experimental

\hat{Y} - valor estimado pelo modelo

N - número de observações experimentais

GLR - graus de liberdade do modelo (número de observações experimentais menos o número de coeficientes do modelo)

O critério de Akaike (AIC) é usado para comparar modelos não aninhados ou quando estão sendo comparados três ou mais modelos. Menores valores de AIC refletem melhor ajuste (AKAIKE, 1974), conforme Eq. 16:

$$AIC = -2 \cdot \log(L) + 2p \quad (16)$$

Em que: p é o número de parâmetros, \log é o valor do logaritmo e L (*like*) função de verossimilhança considerando as estimativas dos parâmetros.

O critério de informação Bayesiana de Schwarz (BIC), Equação 17, também considera o grau de parametrização do modelo, e da mesma forma, quanto menor for o valor de BIC (SCHWARZ, 1978), melhor será o ajuste do modelo. É um critério assintótico, cuja adequação está fortemente relacionada com a magnitude do tamanho

de amostra. Em relação à penalização aplicada na quantidade de parâmetros, esta será mais rigorosa do que a do AIC para amostras pequenas.

$$\text{BIC} = -2 \cdot \log(L) + p \log(n) \quad (17)$$

Em que: n é o número de observações utilizadas para ajustar a curva.

O modelo da difusão líquida para a forma geométrica esfera, com aproximação de oito termos (Eq. 18), foi ajustado aos dados experimentais da secagem das sementes de canola, de acordo com a Eq. 18:

$$\text{RX} = \frac{X - X_e}{X_1 - X_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp\left[-\frac{\lambda_n^2 \cdot D \cdot t}{4} \cdot \left(\frac{2}{r}\right)^2\right] \quad (18)$$

em que:

D - coeficiente de difusão líquida, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

n - número de termos

r - raio equivalente, m

λ_n - raízes da equação de Bessel de ordem zero

O raio equivalente das sementes foi determinado pela Eq. 19:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_g}{4 \cdot \pi}} \quad (19)$$

em que:

V_s - volume das sementes, mm^{-3}

O volume de cada grão (V_g) foi obtido por meio da medição dos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura), em quinze sementes, no final da secagem, com auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, de acordo com a Eq. 20:

$$V_g = \frac{\pi \cdot A \cdot B \cdot C}{6} \quad (20)$$

em que:

A - comprimento, 1,75 mm

B - largura, 1,65 mm

C - espessura, 1,63 mm

A relação entre o aumento do coeficiente de difusão efetivo e a elevação da temperatura do ar de secagem foi descrita por meio da equação de Arrhenius.

$$D = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T_{ab}}\right) \quad (21)$$

em que:

D_0 - fator pré-exponencial

E_a - energia de ativação, kJ mol^{-1}

R - constante universal dos gases, $8,134 \text{ kJ kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T_{ab} - temperatura absoluta

Os coeficientes da expressão de Arrhenius foram linearizados com a aplicação do logaritmo na seguinte forma:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T_{ab}} \quad (22)$$

RESULTADO E DISCUSSÃO

O tempo necessário para que as sementes de canola atingissem o teor de água de $0,080 \pm 0,004$ (b.s.) foi de 10,83; 4,87; 2,17 e 1,5 h para as temperaturas de secagem de 40, 60, 80 e 100 °C, respectivamente. Este fato evidencia que o aumento da temperatura do ar promove redução no tempo de secagem das sementes o valor de razão de teor de água diminui bruscamente com o aumento da temperatura de secagem (Figura 1).

Tais resultados estão de acordo com pesquisas realizadas com outros produtos, como grãos de feijão-caupi (CAMICIA et al., 2015; MORAIS et al., 2013), sementes de crambe (FARIA et al., 2012, COSTA et al., 2011).

Os modelos matemáticos apresentaram elevados coeficientes de determinação, acima de 0,99 (Tabela 2). Assim, os modelos com elevados coeficientes de determinação indicam uma representação satisfatória para o processo de secagem. Ressalta-se que os modelos que apresentaram os maiores coeficientes de determinação foram Wang e Singh, Page e Midilli, independente da temperatura estudada. Conforme Madamba et al. (1996), isoladamente o coeficiente de determinação (R^2) não constitui bom critério para a seleção de modelos não lineares. Desta forma, os valores para o erro médio estimado, *Qui*-quadrado e erro médio relativo foram considerados.

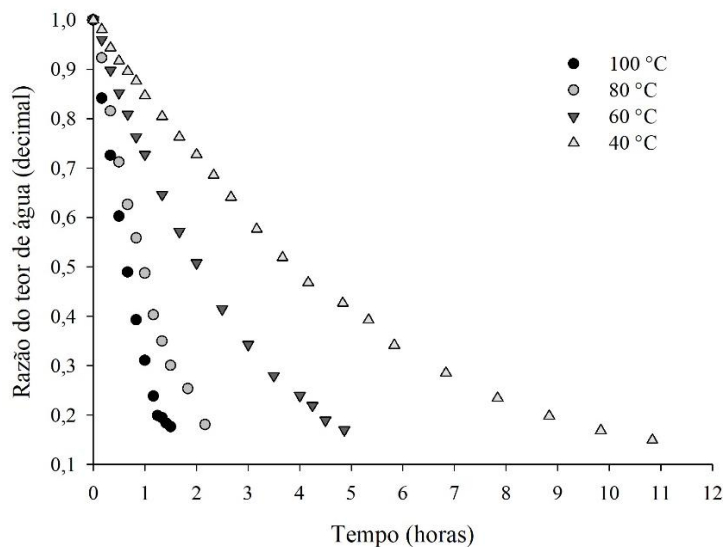


Figura 1 - Razão de teor de água das sementes de canola (*Brassica napus* L.) ao longo do tempo de secagem em quatro condições de temperatura.

Com relação ao erro médio estimado (SE), todos os modelos apresentaram valores abaixo de 0,0267, sendo satisfatório para o bom ajuste dos modelos aos dados experimentais. Verifica-se também que entre os modelos analisados o menor valor apresentado para o teste de *Qui*-quadrado (χ^2) foi para o de Page (5) e obteve os maiores valores para os modelos de Thompson (4) e Exponencial de dois termos (10), segundo Molina Filho et al. (2006) quanto maior for o valor do χ^2 , maior também será a discrepância entre os valores experimentais e o esperado. Deste modo, o valor do *Qui*-quadrado está relacionado a qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais. De uma maneira geral, os modelos de Wang e Singh (2), Page (5) e Midilli (7) apresentaram os menores valores de *Qui*-quadrado.

Os onze modelos estudados obtiveram valores de erro médio relativo (P) para todas as temperaturas, inferiores a 10%. Mohapatra & Rao (2005) ressaltam que, para os modelos representarem de forma adequada o fenômeno de secagem, é necessário que o erro médio relativo seja inferior a 10%. Dessa forma, todos os modelos estudados nesse trabalho representam, satisfatoriamente, a cinética de secagem. Entretanto, ressalta-se que os modelos que apresentaram os menores valores de erro médio relativo foram Wang e Singh (2), Page (5) e Midilli (7) para todas as temperaturas. Para a temperatura de 80 °C os modelos Dois Termos (11) e Aproximação da Difusão (12) também se destacaram.

Tabela 2 - Valores para o teste de erro médio estimado (SE, decimal), *Qui*-quadrado (χ^2 , decimal x 10^{-4}), Coeficientes de determinação (R^2 , decimal) ajustado e erro médio relativo (P, %) calculados para os onze modelos utilizados na representação da cinética de secagem das sementes de canola (*Brassica napus* L.).

Modelos	40 °C				60 °C			
	SE	X ²	P	R ²	SE	X ²	P	R ²
(2)	0,0073	0,53	1,42	0,9994	0,0052	0,27	1,177	0,9997
(3)	0,0104	1,07	2,04	0,9988	0,0070	0,50	1,370	0,9995
(4)	0,0128	1,64	2,27	0,9981	0,0143	2,03	3,119	0,9977
(5)	0,0080	0,65	1,63	0,9992	0,0046	0,21	0,984	0,9998
(6)	0,0125	1,56	2,26	0,9981	0,0138	1,90	3,118	0,9977
(7)	0,0073	0,53	1,16	0,9994	0,0049	0,24	0,980	0,9998
(8)	0,0100	1,00	1,91	0,9989	0,0064	0,41	1,300	0,9996
(9)	0,0107	1,14	1,93	0,9987	0,0103	1,06	2,007	0,9988
(10)	0,0128	1,64	2,26	0,9981	0,0143	2,03	3,118	0,9977
(11)	0,0099	0,98	1,86	0,9990	0,0111	1,23	2,007	0,9988
(12)	0,0131	1,72	2,29	0,9981	0,0070	0,50	1,370	0,9995
	80 °C				100 °C			
(2)	0,0140	1,95	2,305	0,9976	0,0109	1,19	2,883	0,9987
(3)	0,0190	3,60	3,401	0,9959	0,0166	2,74	4,425	0,9973
(4)	0,0245	6,01	4,349	0,9925	0,0267	7,15	6,189	0,9920
(5)	0,0119	1,41	2,566	0,9982	0,0133	1,78	3,458	0,9980
(6)	0,0234	5,46	4,347	0,9925	0,0255	6,50	6,187	0,9920
(7)	0,0106	1,12	2,008	0,9989	0,0146	2,13	3,310	0,9981
(8)	0,0167	2,79	3,088	0,9969	0,0169	2,85	4,543	0,9971
(9)	0,0187	3,48	3,303	0,9956	0,0237	5,64	5,272	0,9937
(10)	0,0245	6,01	4,347	0,9925	0,0267	7,15	6,187	0,9920
(11)	0,0111	1,24	1,907	0,9988	0,0173	2,99	4,383	0,9973
(12)	0,0105	1,10	1,903	0,9988	0,0166	2,74	4,425	0,9973

Considerando os valores mais baixos de AIC e de BIC para um dos critérios de seleção, na Tabela 3, nota-se que o modelo de Page (5) apresentou os menores valores. Juntamente com os fatores estatísticos analisados anteriormente, este modelo foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, sendo, portanto, selecionado para

representar as isotermas de dessecção das sementes de canola. Gomes et al. (2018) ressaltam que vários critérios podem ser usados para ajustar modelos matemáticos aos dados de secagem, sendo, AIC e o BIC um método adicional para reforçar e endossar a tomada de decisões. Estes autores utilizaram o AIC e BIC como informação para seleção dos modelos, em secagem de folhas de jambu para diferentes condições de temperatura e espessuras de camada.

Tabela 3 – Valores (adimensional) de Akaike (AIC) e Bayesiana de Schwarz (BIC) calculados para os onze modelos utilizados na representação da cinética de secagem das sementes de canola (*Brassica napus* L.).

Modelos	40 °C		60 °C		80 °C		100 °C	
	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
(2)	-127,05	-123,64	-126,50	-124,01	-64,63	-63,18	-62,12	-60,58
(3)	-150,12	-148,13	-127,30	-130,42	-44,60	-41,98	-52,40	-51,20
(4)	-128,40	-126,32	-120,38	-124,41	-43,90	-45,23	-49,26	-48,36
(5)	-152,77	-149,89	-131,06	-133,56	-67,85	-99,82	-65,77	-64,31
(6)	-133,37	-131,10	-94,39	-92,72	-53,11	-52,14	-51,05	-50,08
(7)	-150,61	-145,28	-127,12	-122,96	-62,98	-67,56	-62,30	-59,88
(8)	-141,88	-137,34	-118,74	-115,40	-59,59	-57,65	-59,36	-57,42
(9)	-137,05	-133,64	-103,41	-100,91	-57,66	-56,21	-51,90	-50,45
(10)	-150,82	-147,41	-130,29	-127,79	-52,55	-49,38	-56,30	-54,20
(11)	-152,37	-146,69	-128,51	-124,35	-38,60	-36,30	-52,40	-51,20
(12)	-150,92	-147,82	-129,90	-122,35	-53,80	-52,70	-55,26	-58,15

Os parâmetros “k” e “n” do modelo Page (5) foram significativos a 1% pelo teste “t” em todas as temperaturas analisadas. Os valores desses parâmetros estão representados nas Eqs. (23, 24, 25 e 26) para as temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C, respectivamente.

$$RX = \exp(-0,161556 * 40^{1,058301}) \quad (23)$$

$$RX = \exp(-0,325076 * 60^{1,076186}) \quad (24)$$

$$RX = \exp(-0,732860 * 80^{1,136222}) \quad (25)$$

$$RX = \exp(-1,163299 * 100^{1,149194}) \quad (26)$$

A Figura 2 apresenta as curvas de secagem das sementes de canola estimadas pelo modelo Page. Verifica-se o ajuste satisfatório do modelo aos valores experimentais obtidos ao longo da secagem das sementes de canola, demonstrando que o teor de água existente no início do processo de secagem é exponencialmente reduzido até alcançar o teor de água final de $0,080 \pm 0,004$ (b.s.). De acordo com Siles et al. (2015), no final da secagem, a interação entre a água e a matéria seca torna-se mais forte com níveis baixos de teor de água. Constata-se neste trabalho que o tempo de secagem depende da temperatura e que a redução do teor de água é mais rápida no início do processo da secagem.

SILVA et al. (2017) estudando a secagem de sementes de niger (*Guizotia abyssinica* Cass) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, verificaram que o modelo Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais. COSTA et al. (2015), estudando a secagem dos frutos de crambe (*Crambe abyssinica*) nas temperaturas de 35, 45, 60, 75 e 90 °C verificaram que o modelo de Page apresentou o melhor ajuste.

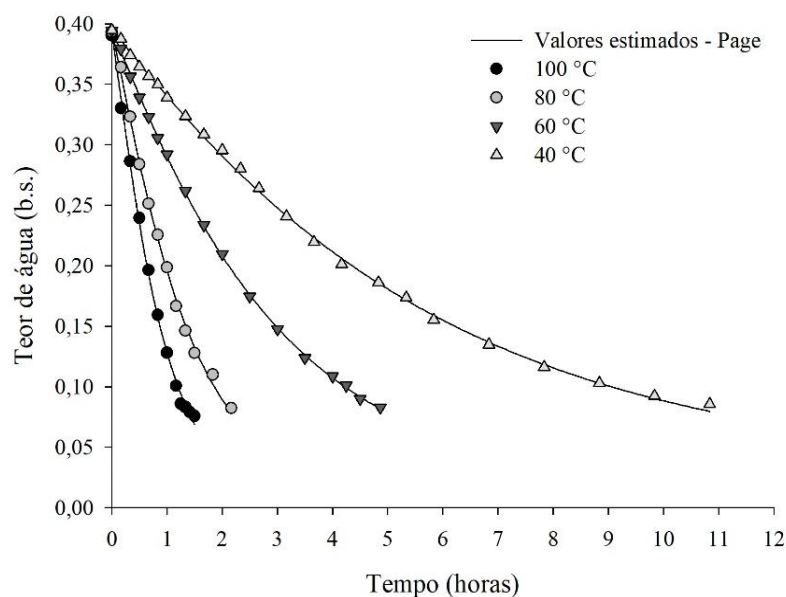


Figura 2 - Valores dos teores de água experimentais e estimados pelo modelo Page para a secagem das sementes de canola (*Brassica napus* L.), nas diversas condições de temperatura.

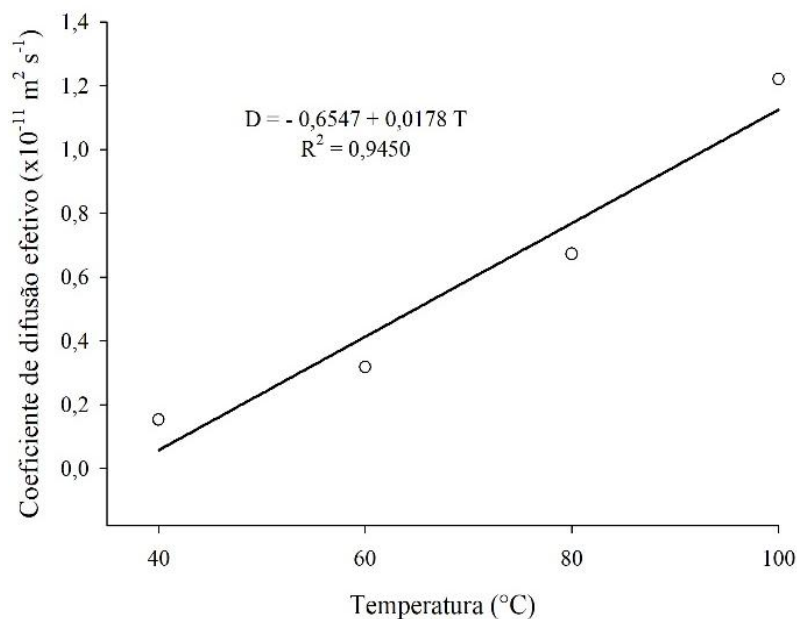


Figura 3 – Valores médios do coeficiente de difusão efetivo ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), obtido para a secagem das sementes de canola (*Brassica napus* L.), nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C.

O coeficiente de difusão efetivo das sementes de canola aumenta linearmente com o incremento da temperatura do ar de secagem, demonstrando maior intensidade do fenômeno de transporte de água do interior do grão para a periferia, corroborando com resultados obtidos por outros pesquisadores para café (ISQUIERDO et al., 2013), frutos de crambe (COSTA et al., 2015) e grãos de pimenta bode (RODOVALHO et al., 2015).

Nota-se que a difusividade da água depende da temperatura do ar de secagem, ou seja, quanto maior a temperatura, menor a resistência das sementes para a remoção de água, aumentando a difusividade. Os coeficientes de difusão efetivos das sementes de canola apresentaram magnitudes entre $0,153 \times 10^{-11}$ a $1,221 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

A dependência do coeficiente de difusão efetivo das sementes de canola com relação à temperatura do ar de secagem foi representada pela expressão de Arrhenius, conforme ilustrado na Figura 4.

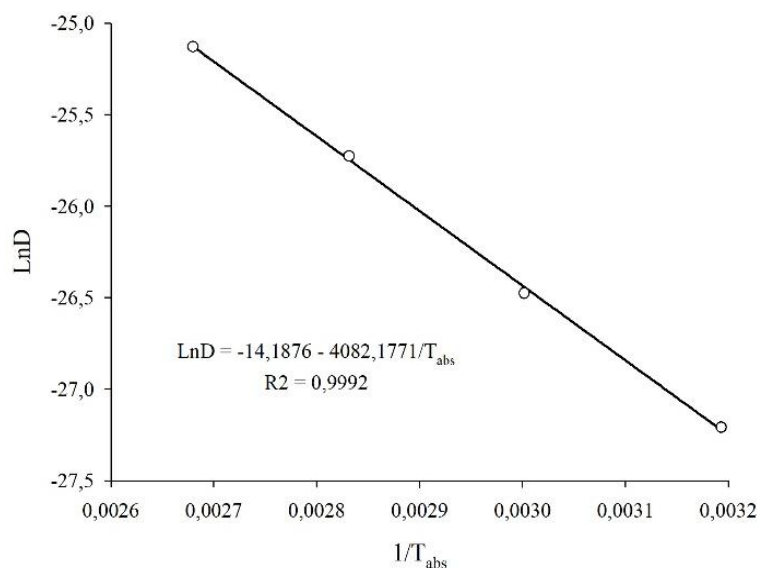


Figura 4 - Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo obtido para a secagem das sementes de canola (*Brassica napus* L.) nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C.

Nota-se que nos processos de secagem quanto menor a energia de ativação maior a difusividade de água no produto. Sendo que a energia de ativação obtida para o fenômeno de secagem das sementes de canola foi de 33,94 kJ mol⁻¹ para a faixa de temperatura estudada neste trabalho de 40, 60, 80 e 100 °C.

Foi encontrado por Gazor & Mohsenimanesh (2010) valor menor de energia de ativação, estudando a secagem de canola em temperaturas entre 30 – 100 °C, de 11,03 kJ mol⁻¹. Já Botelho et al. (2015), estudando sorgo a temperatura entre 40 – 60 °C e Smaniotto et al. (2017) com grãos de girassol a temperaturas entre 35 – 95 °C, encontraram valores de energia de ativação próximos a este estudo, de 33,82-35,31 kJ mol⁻¹ e 29,55 kJ mol⁻¹, respectivamente.

CONCLUSÕES

O tempo de secagem se reduz com o aumento da temperatura, sendo de 10,83 horas para a temperatura de 40 °C e de 1,5 horas para a temperatura de 100 °C.

O modelo de Page foi selecionado para representar a secagem das sementes de canola.

O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura, sendo descrito pela equação de Arrhenius, com energia de ativação de 33,94 kJ mol⁻¹.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Gilberto Omar Tomm, pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Trigo, pelo fornecimento das sementes de canola.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano – Campus Rio Verde).

A CAPES, pela concessão de bolsa ao primeiro autor. Ao CNPq e à Finep, pelo apoio financeiro indispensável na execução do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transaction on Automatic Control**, v.19, p.716-723, 1974.

BOTELHO, F.M., GARCIA, T.R.B., VIANA, J.L., BOTELHO, S.C.C., SOUSA, A.M.B. Cinética de Secagem e Determinação do Coeficiente de Difusão Efetivo de Grãos de Sorgo. **Revista Brasileira Milho e Sorgo**, v.14, n.2 , p.260–272, 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009. p.399.

CAMICIA, R.G.M.; CHRIST, D.; COELHO, S.R.M.; CAMICIA, R.F.M. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, v.28, n.3, p. 06 – 214, 2015.

CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; GARIN, S.A.; JAREN, C.; OLIVEIRA, G.H.H. Mathematical models to describe the volumetric shrinkage rate of red beans during drying. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.4, p. 716-726, 2011.

COSTA, L.M.; RESENDE, O.; GONÇALVES, D.N.; OLIVEIRA, D.E.C. Modelagem matemática da secagem de frutos de crambe em camada delgada. **Bioscience Journal**, v.31, n.2, p.392-403, 2015.

COSTA, L.M.; RESENDE, O.; SOUSA, K.A.; GONÇALVES, D.N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.10, p.1089–1096, 2011.

FARIA, R.Q.; TEIXEIRA, I.R.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.5, p.573–583, 2012.

FIORENTIN, L.D.; MENON, B.T.; ALVES, J.A.; BARROS, S.T.D.; PEREIRA, N.C.; LIMA, O.C.M.; MODENES, A.N. Análise da secagem do bagaço de laranja em camada fina utilizando modelos semi-teóricos e empíricos. **Engevista**, v.14, n.1, p.22-33, 2012.

GAZOR, H.R., MOHSENIMANESH, A. Modelling the Drying Kinetics of Canola in Fluidised Bed Dryer. **Czech Journal Food Sciences**. v. 28, n.6, p. 531-537, 2010.

GOMES, F.P.; RESENDE, O.; SOUSA, E.P.; OLIVEIRA, D.E.C.; ARAÚJO NETO, F.R. Drying kinetics of crushed mass of ‘jambu’: Effective diffusivity and activation energy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.7, p.499-505, 2018.

ISQUIERDO, E.P.; BORÉM, F.M.; ANDRADE, E.T.; CORRÊA, J.L.G.; OLIVEIRA, P.D.; ALVES, G.E. Drying kinetics and quality of natural coffee. **Journal of Food Engineering**, v.56, n.3, p.1003-1010, 2013.

KRÜGER, C.A.M.B.; SILVA, J.A.G.; MEDEIROS, S.L.P.; DALMAGO, G.A.; SARTORI, C.O.; SCHIAVO, J. Arranjo de plantas na expressão dos componentes da produtividade de grãos de canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.11, p.1448- 1453, 2011.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, n.1, p.75-97, 1996.

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

MOLINA FILHO, L.; PEDRO, M.A.M.; TELIS-ROMERO, J.; BARBOSA, S.H.R. Influência da temperatura e da concentração do cloreto de sódio (NaCl) nas isotermas de sorção da carne de tambaqui (*Colossoma macroparum*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.26, n.2, p.453-458, 2006.

MORAIS, S.J.S.; DEVILLA, I.A.; FERREIRA, D.A.; TEIXEIRA, I.R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 3, p. 455-463, 2013.

RODOVALHO, R.S.; SILVA, H.W.; SILVA, I.L.; ROSSETTO, C.A.V. Cinética de secagem dos grãos de pimenta bode. **Global Science Technology**, v.8, n.2, p.128-142, 2015.

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **Annals of Statistics**, v.6, p.461-464, 1978.

SILES, J.A.; GONZÁLEZ-TELLO, P.; MARTÍN, M.A.; MARTÍN, A. Kinetics of alfalfa drying: Simultaneous modelling of moisture content and temperature. **Biosystem Engineering**, v.129, p.185–196, 2015.

SILVA, F.P.; SIQUEIRA, V.C.; QUINZANI, G.A.; MARTINS, E.A.S.; GONELI, A.LD. Drying kinetics of niger seeds. **Engenharia Agrícola**, v.37, n.4, p.727–738, 2017.

SMANIOTTO, T.A. DE S., RESENDE, O., SOUSA, K.A. DE, OLIVEIRA, D.E.C. DE, CAMPOS, R.C. Drying kinetics of sunflower grains. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.3, p.203–208, 2017.

TOMM, G.O. **Indicativos tecnológicos para a produção de canola no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2007a. 68 p.

TOMM, G.O. **Sistema de Produção: Cultivo de Canola**. Embrapa Trigo, 2007b. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/canola/cultivodecanola/epoca_semeadura.html>. Acessado em: 08 abril. 2018.

ZONTA, J.B.; ARAUJO, E.F.; ARAUJO, R.F.; DIAS, L.A.S. Diferentes tipos de secagem: efeitos na qualidade fisiológica de sementes de Pinhão Manso. **Revista Brasileira de Sementes**, v.33, n.4, p.721-731, 2011.

YILMAZ, F.M.; KESEKKAYA, S.Y.; VARDIN, H.; KARAASLAN, M. The effects of drying conditions on moisture transfer and quality of pomegranate fruit leather (pestil), **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 6, n.1, p. 33-40, 2017.

CAPÍTULO II

Qualidade fisiológica das sementes de canola submetidas a secagem e armazenamento

RESUMO - Objetivou-se com o presente trabalho avaliar a qualidade fisiológica das sementes de canola em função de diferentes temperaturas de secagem e durante o armazenamento por nove meses. Foram utilizadas sementes com teor de água inicial 26,76 (% b.u.). A secagem foi realizada em estufa com temperaturas de 40; 60; 80 e 100 °C, sendo as sementes secas em bandejas sem perfurações com 77 g, perfazendo 2 cm de espessura, em três repetições. As bandejas com as amostras foram pesadas, periodicamente, até o teor de água de 7,53 (% b.u.). Após a secagem, as sementes foram acondicionadas em sacos de papel kraft, contendo 20 g e armazenadas por 9 meses. A temperatura e a umidade relativa do ar no ambiente de armazenamento foram registradas. As amostras foram avaliadas aos 0, 3, 6 e 9 meses, em 4 repetições, quanto ao: teor de água, condutividade elétrica, germinação: primeira contagem, segunda contagem e total, IVG, plântulas normais e anormais, comprimentos do hipocótilo e da radícula e massa seca de plântulas normais, sementes não germinadas e teste a frio sendo avaliadas: germinação, plântulas normais e anormais e sementes não germinadas. As temperaturas de secagem influenciam na qualidade fisiológica das sementes e ocasionam maiores reduções de germinação nas sementes secas em temperaturas superiores a 60°C. O teste a frio demonstrou que as sementes se desenvolvem melhor em baixas temperaturas. O armazenamento até 180 dias proporcionou melhor conservação da qualidade fisiológica das sementes em todas as variáveis analisadas.

PALAVRAS-CHAVES: germinação, plântulas, teste a frio.

ABSTRACT - The objective of this study was to evaluate the physiological quality of canola seeds in function of different drying and storage temperatures for nine months. Seeds with initial moisture content were used 26.76 (%w.b.). The drying was done in an oven at 40; 60; 80 and 100 °C. Dried in unperforated trays containing, approximately,

77g, making 2 cm of thickness, in three replicates. In the drying process, the trays with the samples were weighed, periodically, until the moisture content 7.53 (% w.b.). After drying, the seeds were packed in kraft paper bags containing 20g and stored for 9 months. The air temperature and relative humidity in the storage environment were recorded. The samples were evaluated at 0, 3, 6 and 9 months, in 4 replicates, for: moisture content, electrical conductivity, germination: first count, second count and total, GRI, together with the first count was counted normal and abnormal seedlings, hypocotyl lengths, root lengths and dry mass of normal seedlings, seeds not germinated and cold test, and in that test was evaluated: germination, normal and abnormal seedlings, non-germinated seeds. Drying temperatures influence the seeds physiological quality, leading to higher germination reductions in dry seeds at temperatures above 60 °C. The cold test showed that the seeds develop best at low temperatures. The storage up to 180 days provided better conservation of the seeds physiological quality in all analyzed variables.

KEYWORDS: germination, seedlings, cold test.

INTRODUÇÃO

A canola (*Brassica napus* L.) é uma planta transgênica proveniente do melhoramento genético da *Brassica napus* e *Brassica campestris*, com a finalidade de reduzir o teor de ácido erúico e glicosinolatos melhorando sua palatabilidade e a digestibilidade (CHAVARRIA et al., 2011). Trata-se de uma planta anual, herbácea, pertencente à família das Brassicaceae e que produz sementes ricas em óleo de excelente qualidade (ESTEVEZ et al., 2014). É considerada uma das oleaginosas mais importantes, sendo uma das principais fontes de óleo vegetal comestível (ERYILMAZ et al., 2016).

As sementes são pequenas (1 a 2 mm de diâmetro) o que as torna sensíveis às adversidades ambientais desde o plantio até a emergência (MENDONÇA et al., 2016). Assim, o sucesso do estabelecimento e desempenho de uma cultura depende da qualidade das suas sementes, fator que está diretamente relacionado com altas taxas de germinação, de vigor e de sanidade, bem como a garantia da pureza física e genética (CARVALHO & NAKAGAWA, 2012).

Considerando a importância de se obter sementes desta espécie com elevada qualidade, principalmente para subsidiar pequenos agricultores, é fundamental que os métodos de secagem e armazenagem sejam eficientes.

Dentre os sintomas causados pela secagem inadequada ou excesso de água nas sementes, destaca-se principalmente a perda do vigor durante a fase de germinação e desenvolvimento das plântulas. Além disso, podem ocorrer processos de desestruturação das membranas por radicais livres e instabilidade química de lipídios, principalmente em oleaginosas (ZONTA et al., 2011).

A secagem torna-se uma operação crítica quando a colheita é antecipada ou quando as sementes são colhidas com elevado teor de água. A secagem inadequada é uma das principais causas de deterioração durante o armazenamento.

Os processos de secagem utilizando elevadas temperaturas promovem maiores danos às sementes. Ressalta-se que manejos pós-colheita inadequados podem resultar em rápida deterioração qualitativa das sementes. Isso pode ser imperceptível na fase inicial, manifestando-se no decorrer do armazenamento (SIQUEIRA et al., 2016).

A qualidade das sementes não pode, portanto, ser melhorada pelo armazenamento, mas sim preservada com o mínimo de deterioração possível, por meio do armazenamento adequado, visando manter o vigor e o poder germinativo pelo maior período possível (GOLDFARB & QUEIROGA, 2013).

Nesse contexto, objetivou-se com o presente trabalho avaliar a qualidade fisiológica das sementes de canola em função de diferentes temperaturas de secagem e pelo armazenamento por nove meses.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde, GO. Foram utilizadas sementes de canola híbrido Hyola 430 com teor de água inicial de 26,76 (% b.u.). A secagem foi realizada em estufa modelo MA-035, com ventilação forçada nas seguintes condições de ar: temperaturas de secagem de 40; 60; 80 e 100 °C e umidades relativas de 37,15; 16,93; 8,35; 4,41 e 2,47%, respectivamente. As sementes foram secas em bandejas sem perfurações contendo, aproximadamente, 77 g de produto, perfazendo 2 cm de espessura, em delineamento inteiramente ao acaso, em três repetições. Durante o processo de secagem, as bandejas foram pesadas, periodicamente, até o teor de água de 7,53 (%b.u.).

Após a cinética de secagem, as sementes foram acondicionadas em sacos de papel kraft, contendo 20 g cada uma e armazenadas por 9 meses (270 dias) com início em novembro de 2016 a agosto de 2017 em condições ambiente de laboratório. Durante este período a temperatura e umidade relativa do ar ambiente foram registradas por um datalogger digital modelo Log Box – RHT - LCD.

As amostras foram avaliadas aos 0, 3, 6 e 9 meses, em 4 repetições, quanto ao: teor de água (% b.u.), condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$), germinação: primeira contagem (%), segunda contagem (%) e total (%); índice de velocidade de germinação (IVG); plântulas normais e anormais (%); comprimentos do hipocótilo (cm) e sistema radicular de plântulas normais (cm); massa seca de plântulas normais (g), sementes não germinadas (%) e teste de frio modificado, sendo avaliadas: germinação(%), contagem de plântulas normais e anormais (%) e sementes não germinadas (%).

Para a determinação do teor de água foi utilizado o método da estufa a 105 ± 3 °C, durante 24 horas (BRASIL, 2009).

Condutividade Elétrica: foi realizada segundo metodologia descrita por Vieira & Krzyzanowski (1999). Foram utilizadas 4 subamostras de 50 sementes, de cada tratamento, pesadas com balança com resolução de 0,01 g. As amostras foram colocadas para embeber em copos plásticos com 75 mL de água deionizada e mantidas em câmara incubadora tipo B.O.D., com temperatura controlada de 25°C, durante 24 horas. As soluções contendo as sementes foram levemente agitadas para uniformização dos lixiviados, e imediatamente procedeu-se a leitura em condutivímetro digital, sendo os resultados divididos pela massa e expressos em $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$ de sementes.

Germinação primeira contagem: o teste de germinação foi conduzido com quatro subamostras de 50 sementes de cada tratamento, sobre papel germitest umedecido com água destilada, equivalente a 2,5 vezes a massa do substrato seco, visando ao umedecimento adequado e, conseqüentemente, a uniformização do teste. Em seguida, foram mantidas em germinador tipo B.O.D. regulado a temperatura constante de 20°C. As avaliações foram realizadas no 5º dia após a semeadura, segundo os critérios estabelecidos nas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

Germinação segunda contagem: em conjunto com a primeira contagem, sendo esta avaliação efetuada ao sétimo dia após a semeadura, a primeira contagem foi somada com a segunda contagem a fim de obter a contagem total de germinação (BRASIL, 2009).

Índice de Velocidade de Germinação (IVG): foram computados a porcentagem média de germinação e o índice de velocidade de germinação ($IVG = n_1.d_1^{-1} + n_2.d_2^{-1} + n_3.d_3^{-1} \dots n.d_n^{-1}$; sendo n_1 = sementes germinadas no primeiro dia da contagem; n_2 = sementes germinadas no segundo dia da contagem; n_3 = sementes germinadas no terceiro dia da contagem; n_n = sementes germinadas no enésimo dia da contagem; d_1 = primeiro dia, d_2 = segundo dia; d_3 = terceiro dia, d_n = enésimo dia) (MAGUIRE, 1962).

Porcentagem de plântulas normais: foi realizada em conjunto com teste de germinação primeira contagem, computando-se no quinto dia após a semeadura e especificando as seguintes categorias: plântulas com todas as suas estruturas essenciais (sistema radicular e parte aérea) e com tamanho mínimo de 1 cm.

Porcentagem de plântulas anormais: foi efetuada em conjunto com o teste de germinação primeira contagem, sendo no quinto dia após a semeadura, verificado as plântulas com deficiência na parte aérea e no sistema radicular e comprimento inferior a 1 cm.

Comprimento de plântulas normais (CPN): Para obtenção do comprimento da parte aérea (hipocótilo) e do sistema radicular (raiz), dividiu-se o valor total do comprimento das plântulas analisadas, hipocótilo e raiz, pelo número de plântulas avaliadas, sendo os resultados expressos em mm plântula⁻¹, conforme descrito por Nakagawa (1999).

Massa seca de plântulas normais: as plântulas foram colocadas em embalagens de papel kraft e conduzidas para estufa com circulação de ar forçado, mantida em temperatura de 65 °C por 72 h. O material seco foi pesado, em balança com resolução de 0,0001 g. A massa obtida foi dividida pelo número de plântulas que compôs a amostra, obtendo-se a massa média da matéria seca por plântula. A média aritmética das amostras avaliadas constituiu a massa da matéria seca da plântula do tratamento (NAKAGAWA, 1994).

Sementes não germinadas: no final do teste de germinação foram contabilizadas as sementes que não germinaram (BRASIL, 2009).

Teste de frio modificado – foi conduzido conforme as recomendações de Cícero & Vieira (1994) e Barros et al. (1999), sendo quatro repetições de 50 sementes para cada lote, em rolos de papel germitest, umedecidos em quantidade de água equivalente a 2,5 vezes a massa do papel seco. Em seguida, os rolos foram colocados em saco plástico transparente, vedado e mantidos durante sete dias em câmara de germinação tipo B.O.D. regulada a temperatura de 10°C. Após esse período, os rolos foram transferidos para uma B.O.D. com temperatura de 20±1°C, e permaneceram por cinco dias, sendo a seguir avaliada a porcentagem de germinação, porcentagem de plântulas normais e anormais e sementes não germinadas (BRASIL, 2009).

O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso, em esquema de parcela subdividida, sendo cinco temperaturas de secagem controladas (40, 60, 80 e 100 °C) nas parcelas e os meses de avaliação (0, 3, 6 e 9) nas subparcelas. Os dados foram analisados por meio de análise de variância no Sisvar e por meio de regressão no Sigma Plot 10.0. Os modelos foram ajustados com base no coeficiente de determinação e na sua significância, utilizando um programa estatístico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tempos de secagem das sementes de canola considerando a redução do teor de água de 26,76 (% b.u.) para 7,53 (% b.u.), com temperaturas de secagem de 40, 60, 80 e 100°C foram, respectivamente, de 10,83; 4,87; 2,17 e 1,5 horas. Com a elevação da temperatura aumenta a taxa de secagem e diminui o tempo necessário a remoção de água. Porém esse processo, pode provocar diferença de teor de água entre a periferia e o centro da semente, gerando gradiente de pressão que causa danificação a semente. Esse fato apresenta as mesmas características de secagem na maioria das oleaginosas, como, nabo (SOUSA et al.,2011), crambe (COSTA et al., 2012; COSTA et al., 2015).

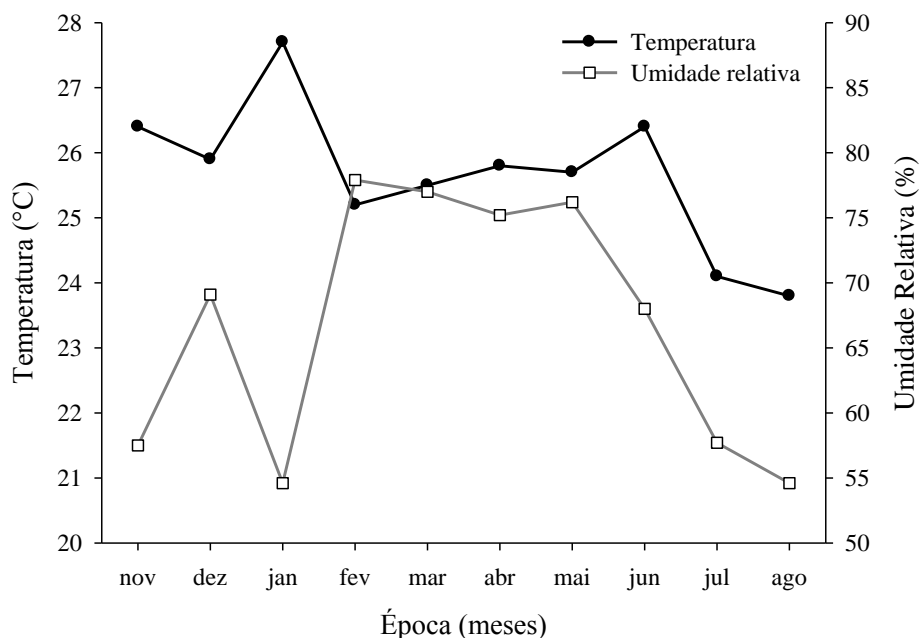


Figura 1 - Médias de Temperatura e Umidade Relativa do ar no ambiente de armazenamento das sementes de canola, secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses.

A média geral da temperatura e da UR no ambiente não controlado de armazenagem foram de $25,75 \pm 1,95$ °C e de $66,25 \pm 11,65\%$ (Figura 1). No mês de janeiro ocorreu maior variação de temperatura e umidade relativa por influência das condições climáticas visto que a temperatura foi superior as demais com média de 27,7 °C, sendo que a UR obteve as menores médias de 54,60% nos meses de janeiro e agosto. Em agosto foi o mês que registrou a menor temperatura, média de 23,8 °C.

As análises de variância e coeficientes de variação correspondentes as variáveis analisadas, obtidas em função da secagem de sementes de canola com quatro diferentes temperaturas e nove meses de armazenamento em sacos de papel kraft em ambiente de laboratório, bem como suas possíveis interações, encontram-se na Tabela 1. Houve efeito conjunto das temperaturas de secagem e do tempo de armazenamento para todas as variáveis analisadas, exceto para o teor de água em que houve efeito dos fatores isoladamente.

Tabela 1 - Resumo da análise de variância para as sementes de canola secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses.

Variáveis analisadas	Fonte de variação	Quadrados médios	CV (%)	
			1	2
Teor de água (% b.u.)	Secagem	0,34*	4,12	2,69
	Tempo	27,20**		
	Secagem x Tempo	0,063 ^{NS}		
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$)	Secagem	23216,27**	10,09	4,64
	Tempo	922,29**		
	Secagem x Tempo	208,66**		
Germinação (%)	1ª contagem	Secagem	12,72	9,72
		Tempo		
		Secagem x Tempo		
	2ª contagem	Secagem	31,46	31,89
		Tempo		
		Secagem x Tempo		
	Total	Secagem	12,92	6,97
		Tempo		
		Secagem x Tempo		
	Teste frio	Secagem	11,97	6,16
		Tempo		
		Secagem x Tempo		
IVG (adimensional)	Secagem	7,84	6,55	
	Tempo			
	Secagem x Tempo			
Plântulas (%)	Normais	Secagem	25,64	23,20
		Tempo		

		Secagem x Tempo	394,92**		
Normais teste frio		Secagem	10166,68**	13,56	13,38
		Tempo	310,07**		
		Secagem x Tempo	124,83**		
Anormais		Secagem	8069,13**	13,88	16,97
		Tempo	191,07**		
		Secagem x Tempo	271,26**		
Anormais teste frio		Secagem	2830,47**	19,82	16,14
		Tempo	53,25**		
		Secagem x Tempo	92,81**		
Comprimento (cm)	Hipocótilo	Secagem	7,13**	28,77	18,86
		Tempo	0,48**		
		Secagem x Tempo	0,13**		
	Raiz	Secagem	28,30**	26,44	19,04
		Tempo	2,01**		
		Secagem x Tempo	0,60**		
Massa seca plântulas normais (g)		Secagem	0,0063**	32,26	30,71
		Tempo	0,00074**		
		Secagem x Tempo	0,00026**		
Sementes não germinadas (%)		Secagem	21406,89**	9,27	5,00
		Tempo	430,81**		
		Secagem x Tempo	71,53**		
Sementes não germinadas teste frio (%)		Secagem	22531,80**	8,46	4,56
		Tempo	125,40**		
		Secagem x Tempo	125,40**		

**Significativo a 1%, *significativo a 5% e ^{NS} não significativo pelo teste F. CV- Coeficiente de Variação.

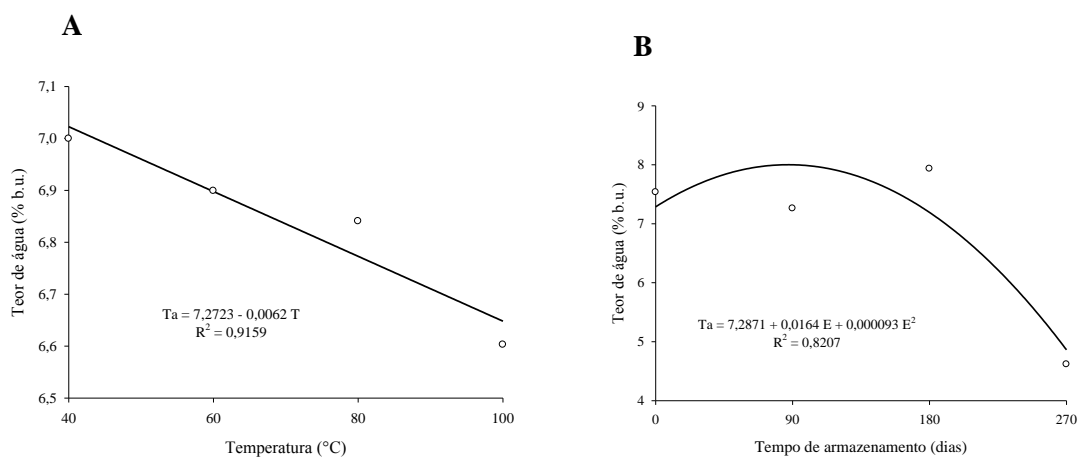
Na Figura 2 A, verifica-se a redução linear no teor de água das sementes de canola na medida em que a temperatura de secagem aumenta. Nota-se, na Figura 2 B, que ocorreu oscilação nos teores de água ao longo do armazenamento, sendo que no final, aos 270 dias de armazenamento, houve queda acentuada nos teores de água das sementes de canola. Observa-se relação direta com a UR do ambiente em que a canola foi armazenada com o teor de água da canola, pois, aos 270 dias de armazenamento, mês de agosto, obteve a menor média de UR. Esta oscilação pode estar relacionada com a permeabilidade da embalagem em que as sementes foram armazenadas, o tipo de embalagem que foi utilizada, pois o papel kraft, permite trocas gasosas com o ambiente. Além disso, as sementes são higroscópicas, sujeitas aos processos de sorção, ou seja, o teor de água está sempre em equilíbrio com a umidade relativa e a temperatura do ar em que estão armazenadas.

Houve aumento da condutividade elétrica (CE) na solução de sementes com a elevação da temperatura de secagem (Figura 2), sendo que as alterações foram mais

intensas nas temperaturas mais elevadas. De modo geral, a CE também aumentou ao longo do período de armazenamento em todas as condições avaliadas. A CE mais intensa foi observada aos 270 dias nas sementes armazenadas com secagem de 100°C, em que a condutividade aumentou de 169,34 para 184,51 $\mu\text{S cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$, sendo que o aumento ocorreu principalmente a partir do terceiro mês de armazenamento. Esses resultados estão de acordo com Faroni et al. (2009), que avaliaram a qualidade de sementes de soja armazenadas em silo tipo bolsa, que observaram aumento significativo da condutividade elétrica, ocorrido a partir do terceiro mês de armazenamento. A crescente liberação de eletrólitos das sementes para a água de embebição durante o período de armazenamento é indicativo de perda de vigor e qualidade fisiológica no armazenamento, segundo Smaniotto et al. (2014).

Azevedo & Neto (2014) relatam que os menores valores, correspondentes a menor liberação de exsudatos, indicam melhor potencial fisiológico, ou seja, maior vigor. Isso revela menor intensidade de desorganização dos sistemas de membranas das células.

Neste estudo, observa-se que há relação entre a condutividade elétrica e a porcentagem da primeira contagem de germinação (Figura 3- A) e na germinação total (Figura 3 – C), e constatam que as alterações de germinações foram mais intensas nas sementes secas em altas temperaturas. Devendo ao fato de que as sementes que foram secas com altas temperaturas liberaram com maior facilidade os solutos para a solução. Esse aumento é esperado, pois, quanto mais alta a temperatura de secagem mais íons são liberados no meio de embebição, aumentando os valores de condutividade elétrica, indicando que houve deterioração da membrana e parede celular.



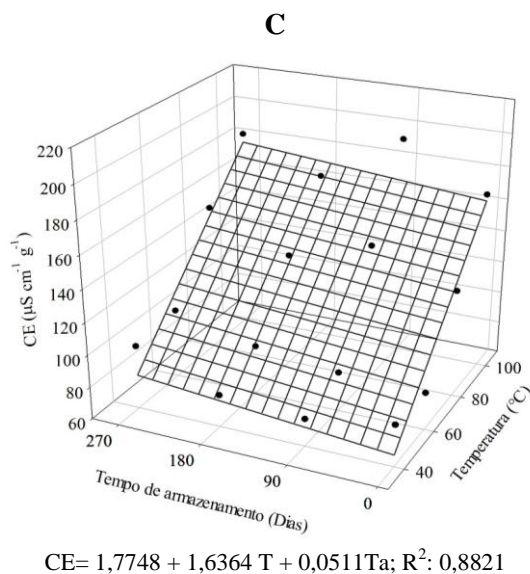
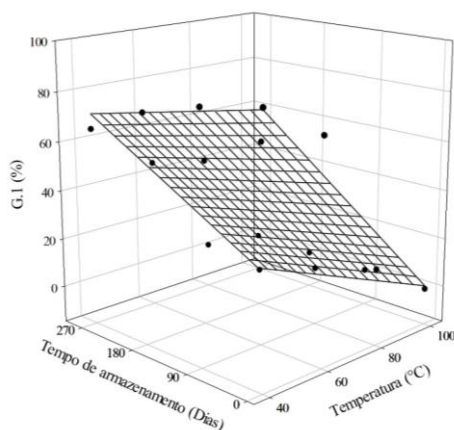


Figura 2 – A) Teor de água da canola secas em diferentes temperaturas. B) Teor de água da canola armazenado por nove meses. C) Condutividade elétrica (CE) das sementes de canola secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses. (*T= Temperatura, Ta= Tempo de armazenamento).

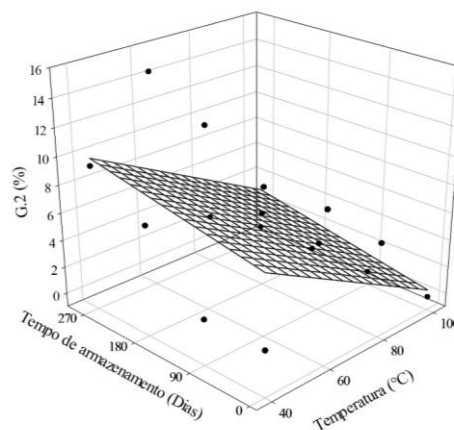
Segundo Costa et al. (2010), os valores da condutividade elétrica podem ser aplicados para avaliar o vigor das sementes, pois, estão relacionados com a quantidade de íons lixiviados na solução e a integridade das membranas celulares, sendo que membranas desestruturadas e danificadas, resultado do armazenamento incorreto, elevam o valor da condutividade elétrica e, em contrapartida, reduzem o vigor das sementes. Simplificadamente, quanto maior a quantidade de lixiviados na água de embebição, maior será a degradação das membranas e menor será o vigor da semente (KULCZYNSKI et al., 2014).

A



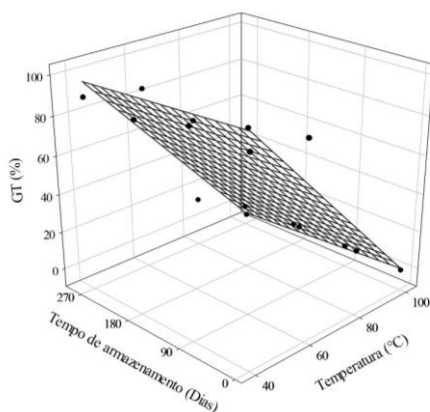
$$G-1 = 145,9104 - 1,4465 T - 0,0605 Ta; R^2: 0,9085$$

B



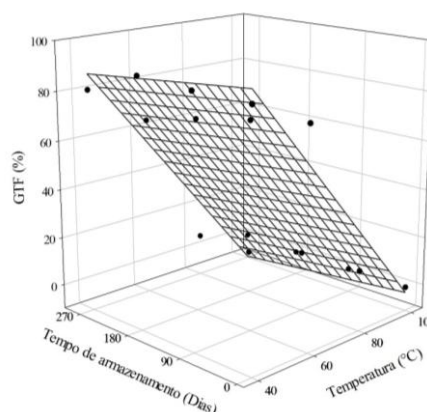
$$G-2 = 12,1646 - 0,1165 T + 0,0094 Ta; R^2: 0,3636$$

C



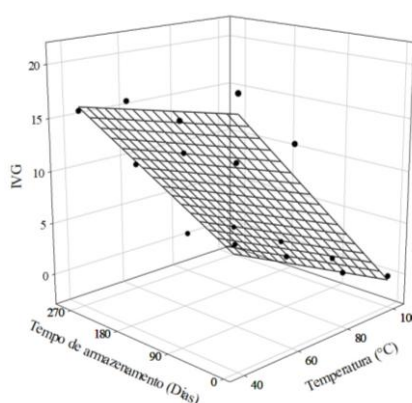
$$G-T = 158,0750 - 1,5629 T - 0,0511 Ta; R^2: 0,9053$$

D



$$GTF = 159,1208 - 1,6137 T - 0,0269 Ta; R^2: 0,9174$$

E



$$IVG = 31,5648 - 0,3189 T - 0,0097 Ta; R^2: 0,9231$$

Figura 3 - Valores experimentais e estimados. A: primeira contagem de germinação (G-1). B: segunda contagem de germinação (G-2). C: germinação total (G-T). D: germinação do teste a frio (GTF). E: índice de velocidade de germinação (IVG) das sementes de canola secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses. (*T= Temperatura, Ta= Tempo de armazenamento).

Os resultados de germinação, de maneira geral, indicam que ocorreu redução na porcentagem ao longo do período de armazenamento em todos os tratamentos realizados. Segundo Paraginski et al. (2015), a redução de germinação das sementes decorre das alterações na estrutura das membranas das sementes sendo que, quando a temperatura e o teor de água inicial das sementes são elevados, as alterações são mais significativas resultando em perda da qualidade final do produto em curtos períodos de tempo.

A temperatura de 40°C manteve maior porcentagem de germinação para todas as épocas de armazenamento e para as sementes secas a 60°C manteve melhor germinação até aos 90 dias de armazenamento, conservando a germinação acima de 70%, apresentaram-se como dentro do padrão básico de comercialização de sementes de canola de acordo com a Instrução Normativa nº 45 MAPA - 2013.

Esses dados indicam que houve melhor preservação do vigor das sementes de canola, chegando aos 270 dias com 65,67% de germinação na primeira contagem que iniciou com 88,83% de germinação na época zero de armazenamento. Ainda na secagem de 40°C a maior porcentagem de germinação ocorreu no teste a frio (Figura 3 - D), e aos 270 dias de armazenamento a germinação foi de 81%.

No estresse imposto pelo teste a frio na germinação, verifica-se que a redução da germinação ao longo do período de armazenamento foi menos acentuada, sendo que de maneira geral houve maior porcentagem de germinação comparativamente às sementes impostas ao teste padrão de germinação. No caso da germinação do teste a frio, mostrou-se como sendo indicado para separar lotes de sementes com diferentes níveis de vigor, quando comparado ao teste padrão de germinação. Segundo Waters & Blanchette (1983) esse teste pode ser prático para avaliar o efeito de estresse causado pelo frio sobre a germinação, pois requer menos espaço e tempo do que testes com areia ou outro tipo de solo.

Observa-se que o IVG (Figura 3 – E) das sementes de canola tende a decrescer, ao longo do tempo de armazenagem e nas altas temperaturas de secagem, indicando influência nos tratamentos estudados. Passando de 20,46; 15,21; 2,16 e 0,06% inicialmente, para 15,81; 9,49; 0,95 e 0,05 no final do armazenamento para a secagem de 40, 60, 80 e 100°C, respectivamente, o IVG é utilizado para identificar sementes com emergência de plântulas mais rápida em campo ou em estufa.

Pelos resultados do vigor de sementes avaliado no teste de primeira contagem de plântulas normais e plântulas normais do teste de frio (Figura 4 – A, B, C, D), pode-se verificar que os maiores percentuais de plântulas normais foram obtidos para a secagem de 40°C com 67% para as sementes germinadas no teste a frio e 62,17% para o teste padrão de germinação no início da armazenagem e regredindo ao longo do armazenamento para 44 e 6,50% aos 270 dias, respectivamente.

É importante ressaltar que o processo de deterioração das sementes armazenadas é inevitável, porém, quando expostas a oscilações de temperatura e umidade relativa, as sementes perdem o vigor mais rapidamente ficando mais suscetíveis a estresses durante a germinação e, eventualmente, reduzindo sua capacidade de originar plântulas normais (SILVA et al., 2014).

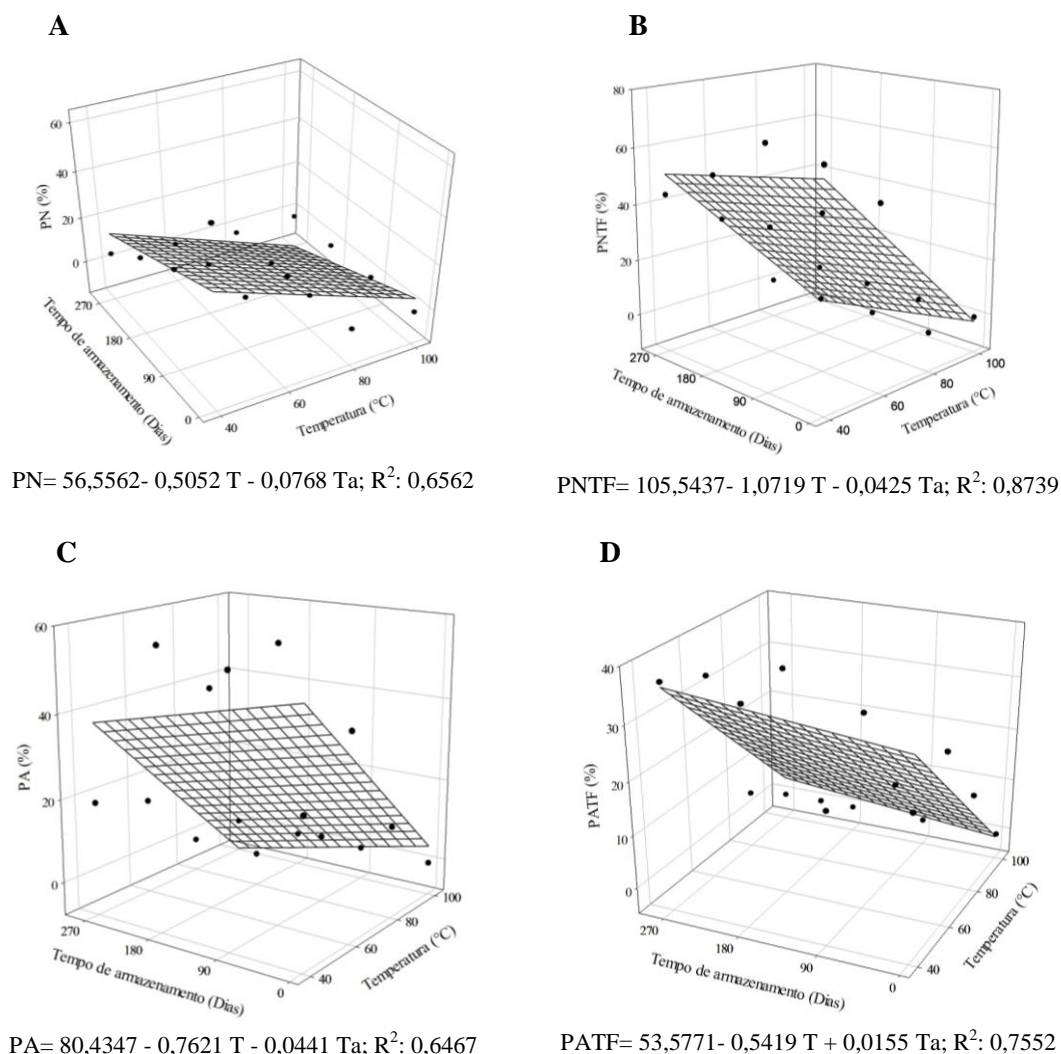
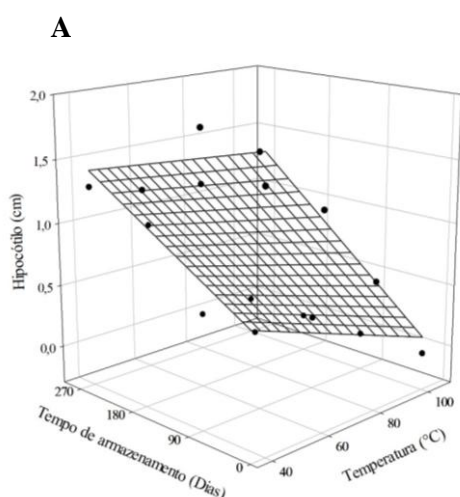


Figura 4 - A: plântulas normais (PN). B: plântulas normais do teste de frio (PNTF). C: plântulas anormais (PA). D: plântulas anormais teste de frio (PATF), das sementes de canola secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses. (*T= Temperatura, Ta= Tempo de armazenagem).

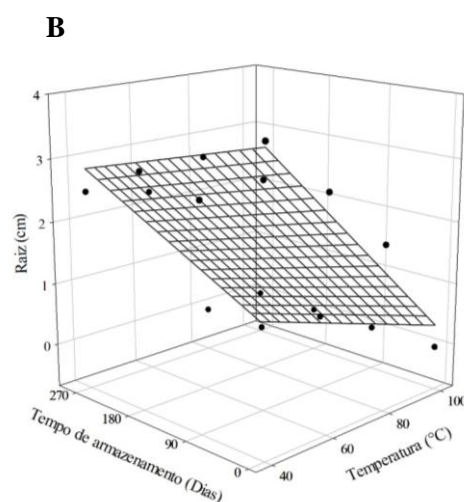
Observa-se que para as sementes secas em temperatura de 40 e 60°C houve acréscimo no comprimento do hipocótilo até aos noventa dias e reduzindo em seguida até o final do armazenamento (Figura 5 A). Na Figura 5 B, no sistema radicular houve uma oscilação ao longo do armazenamento para as sementes submetidas ao procedimento de secagens com temperaturas de 40 e 60°C sendo que os maiores comprimento de raiz foram observados para essas sementes, indicando que foram mais vigorosa, estes resultados evidenciam, portanto, o efeito significativo da secagem em baixas temperaturas. Além disso, a associação entre o comprimento de plântula (sistema radicular e hipocótilo) e a uniformidade dos lotes de sementes por meio do vigor tem sido uma eficiente avaliação do potencial fisiológico (ALVARENGA et al., 2012; GOMES-JÚNIOR et al., 2014).

A massa seca de plântulas normais (Figura 5 - C) diminuiu expressivamente com a redução da germinação das sementes secas, conforme o aumento da temperatura de secagem para todos os meses de armazenagem. Assim, as sementes secas com a temperatura de 40°C apresentam maior vigor, demonstrando relação direta com o desenvolvimento inicial das plântulas.

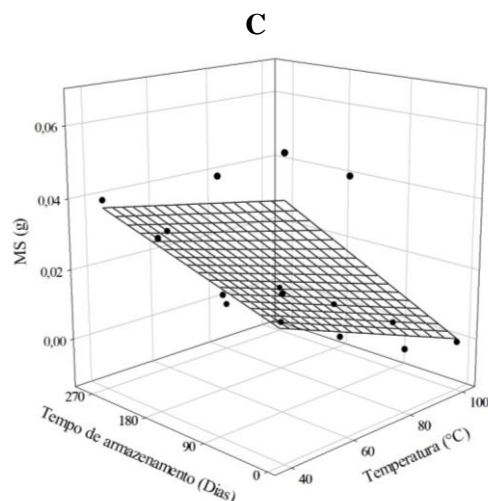
As plântulas com hipocótilo, raiz e massa seca maiores, indicam boa qualidade fisiológica das sementes que as originaram e são consideradas mais vigorosas, ocorre melhor transferência das reservas contidas nas sementes para a plântula em formação, e propiciam maior acúmulo de matéria seca e, conseqüentemente, poderá gerar radículas mais densas.



$$H = 3,0023 - 0,0287 T - 0,0016 Ta; R^2: 0,8726$$



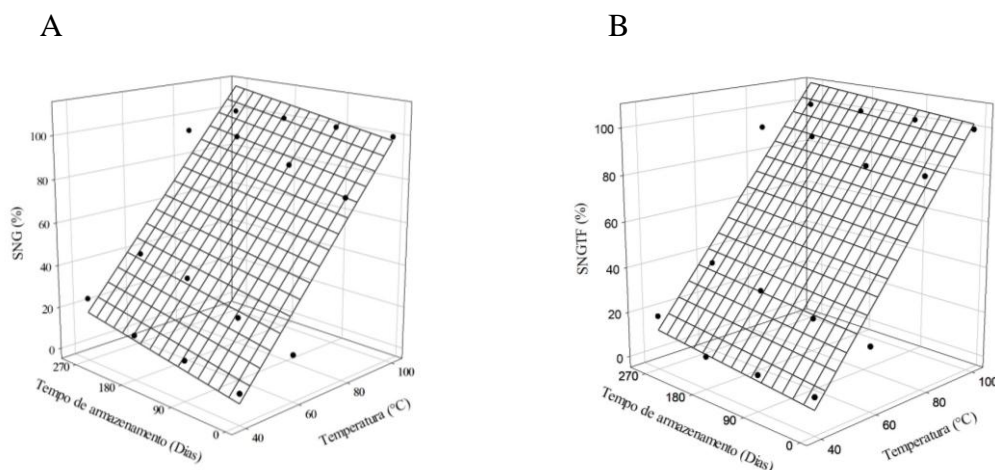
$$R = 6,0276 - 0,0567 T - 0,0033 Ta; R^2: 0,8553$$



$$MS = 0,0863 - 0,0009 T - 5,2986 \cdot 10^{-5} Ta; R^2: 0,7946$$

Figura 5 - A: comprimento de hipocótilo (H). B: comprimento de raiz (R). C: massa seca (MS) de plântulas normais, das sementes de canola secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses. (*T= Temperatura, Ta= Tempo de armazenamento).

A porcentagem de sementes não germinadas (Figura 6 – A e B) aumentou à medida que se elevou a temperatura de secagem e o período de armazenamento. Resultado que permite relacionar o período de armazenamento e a temperatura de secagem com vigor das sementes de canola. O maior percentual de sementes não germinadas poderá estar relacionado não apenas com a temperatura de secagem como ao tipo de substrato utilizado, ao grau de maturidade fisiológica da semente, e a algum tipo de dormência.



$$SNG = - 58,0750 + 1,5629 T + 0,0511 Ta; R^2: 0,9053$$

$$SNGTF = - 58,9708 + 1,6117 T + 0,0268 Ta; R^2: 0,9231$$

Figura 6 - A: Sementes não germinadas (SNG). B: sementes não germinadas do teste de frio (SNGTF), das sementes de canola secas em diferentes temperaturas e armazenadas por nove meses. (*T= Temperatura, Ta= Tempo de armazenamento).

CONCLUSÕES

A germinação total e a germinação do teste a frio das sementes de canola na secagem de 40°C, manteve ao longo do armazenamento acima de 70%, apresentando-se como dentro do padrão básico de comercialização de sementes de canola, de acordo com a Instrução Normativa nº 45 MAPA - 2013.

As sementes de canola se desenvolvem melhor em baixas temperaturas, com maior vigor quando comparado ao teste padrão de germinação.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano – Campus Rio Verde).

Ao Dr. Gilberto Omar Tomm, pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Trigo, pelo fornecimento das sementes de canola.

A CAPES, pela concessão de bolsa ao primeiro autor. Ao CNPq e à Finep pelo apoio financeiro indispensável na execução do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, R.O.; MARCOS-FILHO, J.; GOMES-JUNIOR, F.G. Avaliação do vigor de sementes de milho superdoce por meio da análise computadorizada de imagens de plântulas. **Revista Brasileira de Sementes**, v.34, n.3, p.488–494, 2012.

AZEVEDO, T.P.; NETO, A.F. Avaliação da qualidade fisiológica de sementes de *Carica papaya* L. em função do estágio de maturação. **Revista Verde**, v.9, n.2, p.68-72, 2014.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009. p.399.

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

CHAVARRIA, G.; TOMM, G.O.; MULLER, A.; MENDONÇA, H.F.; GONÇALVES, A. C. Índice de área foliar em canola cultivada sob variações de espaçamento e de densidade de semeadura. **Ciência Rural**, v.41, n.12, p.2084-2089, 2011.

COSTA, A.R.; FARONI, L.R.D.; ALENCAR, E.R.; CARVALHO, M.C.S; FERREIRA, L.G.; Qualidade de grãos de milho armazenados em silos bolsa. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, n.2, p.200-207, 2010.

COSTA, L.M.; RESENDE, O.; GONÇALVES, D.N.; SOUSA, K.A.; SALES, J.F.; DONADON, J.R. The influence of drying on the physiological quality of crambe fruits. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.34, n.2, p.213-218, 2012.

COSTA, L.M.; RESENDE, O.; GONÇALVES, D.N.; OLIVEIRA, D.E.C. Modelagem matemática da secagem de frutos de crambe em camada delgada. **Bioscience Journal**, v.31, n.2, p.392-403, 2015.

ERYILMAZ, T. YESILYURT, M.K.; CESUR, C.; GOKDOGAN, O. Biodiesel production potential from oil seeds in Turkey. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v.58, p.842-851, 2016.

ESTEVEZ, R.L.; DUARTE, J.B.; CHAMBO, A.P.S.; CRUZ, M.I.F. A cultura da canola (*Brassica napus* var. oleifera). **Scientia Agraria Paranaensis**, v.13, n.1, p.1-9, 2014.

FARONI, L.R.A.; ALENCAR, E.R.; PAES, J.L.; COSTA, A.R.; ROMA, R.C.C.; Armazenamento de soja em silos tipo bolsa. **Engenharia Agrícola**, v.29, n.1, p.91-100, 2009.

GOLDFARB, M.; QUEIROGA, V.P. Considerações sobre o armazenamento de sementes. **Tecnologia e Ciência Agropecuária**, v.7, n.3, p.71-74, 2013.

GOMES-JUNIOR, F.G.; CHAMMA, H.M.C.P.; CICERO, S.M. Automated image analysis of seedlings for vigor evaluation of common bean seeds. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.36, n.2, p.195, 2014.

KULCZYNSKI, S.M.; MACHADO, E.C.; BELLÉ, C.; SANGIOGO, M.; KUHN, P.R.; SORATTO, R.P. Teste de Condutividade Elétrica para Avaliação da Qualidade Fisiológica de Sementes de Gergelim (*Sesamun indicum* L.). **Revista agrarian**, v.7, n.23, p.72-81, 2014.

MAGUIRE, J.D. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, v.2, n.1, p.176-177, 1962.

MENDONÇA, J.A.; RIBOLDI, L.B.; SOARES, C.D.F.; CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A. **Canola (*Brassica napus*L.)**. Piracicaba: ESALQ, Divisão de Biblioteca, 2016. 32 p. (Série Produtor Rural, n. 61).

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho de plântulas. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA NETO, J.B. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. cap.2, p.1-24.

NAKAGAWA, M. **ABC: custeio baseado em atividades**. Editora Atlas. 1ª Edição. São Paulo. 1994.

PARAGINSKI, R.T.; ROCKENBACH, B.A.; SANTOS, R.F.; ELIAS, M.C.; OLIVEIRA, M.; Qualidade de grãos de milho armazenados em diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.4, p.358–363, 2015.

ROCHA, C.R.M.; SILVA, V.N.; CICERO, S.M. Avaliação do vigor de sementes de girassol por meio de análise de imagens de plântulas. **Ciência Rural**, v.45, n.6, p.970-976, 2015.

SILVA, M.; SOUZA, H.R.T.; DAVID, H.M.S.S.; SANTOS, L.M.; SILVA, R.F.; AMARO, H.T.R. Qualidade fisiológica e armazenamento de sementes de feijão-comum produzidas no norte de Minas Gerais. **Revista Agro Ambiente**, v.8, n.1 ,p.97-103, 2014.

SIQUEIRA, V.C.; BORÉM, F.M.; ISQUIERDO, E.P.; ALVES, G.E.; RIBEIRO, D.E.; PINTO, A.C.F.; TAVEIRA, J.H.S. Drying of hulled naturally processed coffee with high moisture content and its impacts on quality. **African Journal of Agricultural Research**, v.11, n.31, p.2903-2911, 2016.

SOUSA, K.A.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; COSTA, L.M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.4, p.883-892, 2011.

SMANIOTTO, T.A.S.; RESENDE, O.; MARÇAL, K.A.F; OLIVEIRA, D.E.C.; SIMON, G.A. Qualidade fisiológica das sementes de soja armazenadas em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.4, p.446–453, 2014.

VIEIRA, R.D.; KRZYZANOWSKI, F.C. **Teste de condutividade elétrica**. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA NETO, J.B. (Eds.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina, PR: ABRATES, Cap. 04, p.1-26, 1999.

WATERS, L.; BLANCHETTE, L.B. Prediction of sweet corn Field emergence by conductivity and cold tests. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.108, p.778-781, 1983.

ZONTA, J.B.; ARAUJO, E.F.; ARAUJO, R.F.; DIAS, L.A.S. Diferentes tipos de secagem: efeitos na qualidade fisiológica de sementes de Pinhão Manso. **Revista Brasileira de Sementes**, v.33, n.4, p.721-731, abril 2011.

CAPÍTULO III

ISOTERMAS DE DESSORÇÃO E CALOR ISOSTÉRICO DAS SEMENTES DE CANOLA

RESUMO - As isotermas de equilíbrio higroscópico dos produtos apresentam grande importância, por ter como finalidade estabelecer se o produto tende a ganhar ou a perder água sob determinadas condições de temperatura e umidade relativa do ar. Neste trabalho objetivou-se determinar as isotermas de dessorção das sementes de canola e obter os valores do calor isostérico de dessorção em função do teor de água de equilíbrio. As isotermas de dessorção foram obtidas pelo método estático indireto, sendo a atividade de água (a_w) determinada para diferentes condições de temperatura e teores de água das sementes. Aos dados experimentais foram ajustados oito modelos matemáticos, frequentemente utilizados para representação da higroscopicidade de produtos agrícolas. Para uma mesma temperatura, eleva-se o teor de água de equilíbrio, com o aumento da atividade de água. As isotermas de dessorção apresentam formato sigmoidal do tipo II. O modelo de Halsey Modificado foi o único adequado para representar a higroscopicidade das sementes de canola para a faixa de temperatura de 10 a 40 °C e atividade de água entre 0,2973 a 0,8770. Recomendam-se para armazenamento seguro da canola os teores de água de 7,94; 7,66; 7,39 e 7,14 para as temperaturas de 10, 20, 30 e 40 °C, respectivamente, com umidade relativa de equilíbrio de 68%. Os valores de calor isostérico integral de dessorção para as sementes de canola na faixa do teor de água de equilíbrio de 3,99 a 16,62 (% b.s.) variaram de 2,640 a 2,460 kJ kg⁻¹.

PALAVRAS-CHAVES: modelagem matemática, teor de água de equilíbrio, atividade de água.

ABSTRACT - The isotherms of hygroscopic equilibrium of products are of great importance because they have as purpose to establish if the product tends to gain or to lose water under certain conditions of temperature and relative humidity. The objective

of this work was to determine the sorption isotherms of the canola grains and to obtain the desorption isosteric heat values as a function of the equilibrium moisture content. For different conditions of temperature and water activity using the indirect static method, the water activity (w_a) being determined by the Hygropalm Model Aw1. To the experimental data were adjusted eight mathematical models frequently used to represent the agricultural products hygroscopicity. For the same temperature, the equilibrium moisture content increases on a dry basis, with increased water activity. The desorption isotherms are of type II sigmoidal. The Modified Halsey model was the only one suitable to represent the hygroscopicity of the canola seeds for the temperature range from 10 to 40 ° C and water activity between 0.2973 to 0.8770. It is recommended for safe storage of canola moisture contents of 7.94; 7.66; 7.39 and 7.14 for the temperatures of 10, 20, 30 and 40 °C, respectively, with equilibrium relative humidity of 68%. The values of isosteric integral desorption heat for canola seeds in the range of the equilibrium moisture content from 3.99 to 16.62 (% d.b.) ranged from 2.640 to 2.460 kJ kg⁻¹.

KEYWORDS: mathematical modeling, equilibrium moisture content, water activity.

INTRODUÇÃO

A canola (*Brassica napus* L. var. *oleifera*) é uma das principais oleaginosas da agricultura mundial. Constitui importante fonte de óleo vegetal comestível, por ser utilizada na produção de biodiesel (BANDEIRA et al., 2013).

Pertence à família Brassicaceae, sendo uma das principais culturas oleaginosas, juntamente com a soja em nível mundial, apresenta elevado teor de óleo em suas sementes (36% a 42%) e alta concentração de proteína no farelo (36% a 38%) (CASTRO et al., 2010).

O uso de sementes de qualidade é um parâmetro relevante para comercialização, podendo afetar o valor do produto. Neste sentido, o armazenamento adequado das sementes recém-colhidas até o destino desejado permite a preservação de características qualitativas e pode evitar que ocorra significativa deterioração.

De modo a realizar adequadamente as operações de armazenamento e secagem, é necessário conhecer como a temperatura se relaciona com a umidade relativa do ar. Para isso, o equilíbrio higroscópico deve ser conhecido sob diversas condições ambientais para determinar o ganho ou a perda de água em determinadas condições de temperatura e umidade relativa do ar, afetando diretamente a secagem e o armazenamento (HESSINI et al., 2015). O comportamento higroscópico de produtos

agrícolas tem sido estudado a partir de modelos matemáticos que podem prever, com precisão, o teor de água de equilíbrio para determinada faixa de temperatura e de atividade de água para recomendar a um armazenamento seguro (CHEN & WENG, 2010).

A determinação das atividades de água em função do teor de água de equilíbrio (X_e) expressas em porcentagem base seca (% b.s.) é relevante para conservação do produto. Essa propriedade pode ser estudada determinando-se experimentalmente as isotermas de adsorção ou de dessorção. No armazenamento de alimentos secos (como grãos, sementes, amido), quatro fatores são importantes: a atividade de água (a_w), o teor de água de equilíbrio (X_e), a umidade relativa do ar e a temperatura do ambiente. A a_w é a característica principal, pois dependendo deste valor no alimento pode-se determinar a sua vida de prateleira (RAMOS et al., 2017).

Diante da importância do conhecimento do equilíbrio higroscópico dos produtos agrícolas, objetivou-se com este trabalho determinar, pelo método estático indireto, as isotermas de dessorção e calor isostérico para as sementes de canola.

MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Pós-colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde localizado no município de Rio Verde, GO, Brasil.

Para condução do experimento, utilizaram-se sementes de canola híbrido Hyola 430 com teor de água inicial de 14,0 (% b.s.). Os teores de água das sementes foram obtidos pela secagem feita em estufa com ventilação forçada, mantida na temperatura de 40°C. A redução do teor de água ao longo da secagem foi acompanhada pelo método gravimétrico, com sequências de pesagens até que se alcançasse o teor de água de 4,2; 6,6; 7,7; 8,5; 10,0 e 14,0 (% b.s.). Após a aquisição, determinou-se o teor de água das sementes pelo método da estufa a 105 ± 3 °C, por 24 horas (BRASIL, 2009).

As isotermas de sorção das sementes de canola foram determinadas utilizando o método estático indireto, sendo a atividade de água (a_w) determinada por meio do equipamento Hygropalm Model Aw1. Para cada teor de água foram utilizadas três amostras de aproximadamente 20 g, as quais foram colocadas individualmente no

recipiente do equipamento e acondicionados em B.O.D. (Biochemical Oxygen Demand) regulada a temperatura de 10, 20, 30 e 40 °C.

Aos dados experimentais foram ajustados os modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da higroscopicidade de produtos agrícolas, cujas equações estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de higroscopicidade de produtos vegetais.

Designação do modelo	Modelos
$Xe^* = a \cdot b \cdot \ln[-(T+c) \cdot \ln(a_w)]$	Chung-Pfost (1)
$Xe^* = \exp[a - (b \cdot T) + (c \cdot a_w)]$	Copace (2)
$Xe^* = [\exp(a - b \cdot T) / -\ln(a_w)]^{1/c}$	Halsey Modificado (3)
$Xe^* = a \cdot (a_w^{b/T^c})$	Sabbah (4)
$Xe^* = \exp\{a - (b \cdot T) + [c \cdot \exp(a_w)]\}$	Sigma Copace (5)
$Xe^* = (a + bT) / [(1 - a_w) / a_w]^{1/c}$	Oswin Modificado (6)
$Xe^* = [\ln(1 - a_w) / -a(T + b)]^{1/c}$	Henderson Modificado (7)
$Xe^* = [\ln(1 - a_w) / -a(T + 273,15)]^{1/b}$	Henderson (8)

Em que:

Xe^* = teor de água de equilíbrio, % b.s

a_w = atividade de água de equilíbrio, % b.s

T = temperatura, °C

a, b, c = coeficientes que dependem do produto

Para o ajuste dos modelos matemáticos foi realizada análise de regressão não linear, pelo método Gauss Newton. Para verificar o grau de ajuste de cada modelo considerou-se a significância do coeficiente de regressão pelo teste t adotando-se o nível de 1% de significância, a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), o erro médio estimado (SE), o Qui-quadrado (χ^2), os valores do erro médio relativo (P), foi considerado o critério de Akaike (AIC) e o critério de informação Bayesino (BIC). O

erro médio relativo, o teste de *Qui*-quadrado e o erro médio estimado foram calculados para cada modelo matemático utilizando as seguintes expressões, respectivamente:

$$SE = \sqrt{\frac{(Y - \hat{Y}^2)}{GLR}} \quad (9)$$

$$\chi^2 = \sum \frac{|Y - \hat{Y}|^2}{GLR} \quad (10)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (11)$$

em que:

Y - valor experimental

\hat{Y} - valor estimado pelo modelo

n - número de observações experimentais

GLR - graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo)

O critério de Akaike (AIC) é usado para comparar modelos não aninhados ou quando estão sendo comparados três ou mais modelos. Menores valores de AIC refletem melhor ajuste (AKAIKE, 1974), conforme expressão:

$$AIC = -2 \cdot \log(L) + 2p \quad (12)$$

Em que: p é o número de parâmetros, *log* é o valor do logaritmo e *L* (*like*) função de verossimilhança considerando as estimativas dos parâmetros.

O critério de informação Bayesino (BIC), Equação 13, também considera o grau de parametrização do modelo, e da mesma forma, quanto menor for o valor de BIC (SCHWARZ, 1978), melhor será o ajuste do modelo. É um critério assintótico, cuja adequação está fortemente relacionada com a magnitude do tamanho de amostra. Em relação a penalização aplicada na quantidade de parâmetros, esta será mais rigorosa do que a do AIC para amostras pequenas.

$$BIC = -2 \cdot \log(L) + p \log(n) \quad (13)$$

Em que: n é o número de observações utilizadas para ajustar a curva

Os valores do calor isostérico líquido de sorção (ou entalpia diferencial), para cada teor de água de equilíbrio, foram obtidos por meio da equação Clausius-Clayperon (IGLESIAS & CHIRIFE, 1976):

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial T} = \frac{\Delta h_{st}}{RT_a^2} \quad (14)$$

em que:

T_a : temperatura absoluta, K

Δh_{st} : calor isostérico líquido de sorção, kJ kg^{-1}

R: constante universal dos gases, $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, sendo para o vapor d'água $0,4619 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Integrando a Equação 14 e assumindo que o calor isostérico líquido de sorção é independente da temperatura, obtém-se o calor isostérico líquido de sorção, para cada teor de água de equilíbrio, conforme a Equação 15 (WANG & BRENNAN, 1991):

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{\Delta h_{st}}{R}\right) \cdot \frac{1}{T_a} + C \quad (15)$$

em que:

C: coeficiente do modelo

Os valores de atividade de água, temperatura e teor de água de equilíbrio foram obtidos a partir das isotermas de dessorção das sementes de canola, utilizando o modelo de melhor ajuste aos dados experimentais. O calor isostérico integral de sorção foi obtido adicionando-se aos valores de calor isostérico líquido de sorção, o valor do calor latente de vaporização da água livre de acordo com a Equação 16:

$$Q_{st} = \Delta h_{st} + L = a \cdot \exp(-b \cdot X e^*) + c \quad (16)$$

em que:

Q_{st} : calor isostérico integral de sorção, kJ kg^{-1}

a, b e c: coeficientes do modelo

L: calor latente de vaporização da água livre, kJ kg^{-1}

O calor latente de vaporização da água livre (L), em kJ kg^{-1} , necessário ao cálculo de Q_{st} , foi obtido utilizando-se a temperatura média (T) na faixa em estudo, em $^{\circ}\text{C}$, por meio da seguinte equação:

$$L = 2502,2 - 2,39 \cdot T \quad (17)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios do teor de água de equilíbrio higroscópico das sementes de canola para as temperaturas de 10, 20, 30, 40 $^{\circ}\text{C}$ e atividade de água entre 0,2973 a 0,8770 (decimais) são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores médios do teor de água de equilíbrio (% bs) das sementes de canola (*Brassica napus* L.) obtidos pelo processo de adsorção, em função da temperatura e da atividade de água.

Atividade de água (decimal)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)			
	10	20	30	40
0,2973	4,17	-	-	-
0,2987	-	4,04	-	-
0,3240	-	-	3,99	-
0,3743	-	-	-	4,18
0,4980	5,26	-	-	-
0,5003	-	5,34	-	-
0,5110	-	-	5,07	-
0,5120	-	-	-	5,21
0,6670	6,38	-	-	-
0,6790	-	-	6,28	-
0,6900	-	-	-	7,33
0,7253	8,70	-	-	-
0,7427	-	-	8,70	-
0,7853	11,11	-	-	-
0,8053	-	11,38	-	-
0,8630	16,28	-	-	-
0,8770	-	16,62	-	-

Nota-se que uma mesma temperatura eleva-se o teor de água de equilíbrio em base seca (X_e^*) com o aumento da atividade de água (a_w). Condição semelhante também foi constatada por Costa et al. (2013) ao estudarem o teor de água de equilíbrio higroscópico dos frutos de crambe e de Silva et al. (2015) determinando as isotermas de

dessorção das sementes de pimenta (*Capsicum chinense* L.), variedade Cabacinha. Estes dados seguem a tendência da maioria dos produtos vegetais já estudados.

Constata-se que na faixa de a_w entre 0,2973 a 0,6790 o X_e^* variou de 3,99 a 6,38% b.s. entre as quatro temperaturas. Esses valores representam teores de água seguros para inibir o desenvolvimento de microrganismo em sementes oleaginosas por um período de armazenamento mais longo.

Tabela 3 - Parâmetros dos modelos ajustados aos teores de água de equilíbrio higroscópico para sementes de canola (*Brassica napus* L.) com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2), erro médio estimado (SE), *Qui*-quadrado (χ^2), erro médio relativo (P), Akaike (AIC) e Bayesino (BIC).

Modelos	Parâmetros	R^2	SE	χ^2	P	AIC	BIC
		decimal			%		
Chung-pfost	a= 29,2297**	0,8843	1,469	2,157	16,42	68,71	74,04
	b= 5,1488**						
	c= 121,2243 ^{ns}						
Copace	a= 0,1971 ^{ns}	0,9155	1,255	1,574	15,90	62,10	65,43
	b= 0,0044 ^{ns}						
	c= 2,9524**						
Halsey Modificado	a= 2,0227**	0,9810	0,596	0,355	7,13	45,20	48,54
	b= 0,0050 ^{ns}						
	c= 1,4123**						
Sabbah	a= 22,9325**	0,8332	1,763	3,108	20,87	72,78	76,11
	b= 1,8037**						
	c= 0,0932 ^{ns}						
Sigma Copace	a= -0,8852**	0,9504	0,962	0,925	12,59	54,72	58,05
	b= 0,0037 ^{ns}						
	c= 1,5389**						
Oswin Modificado	a= 5,4431**	0,9658	0,798	0,636	10,05	50,86	54,18
	b= -0,0192 ^{ns}						
	c= 1,7014**						
Henderson Modificado	a= 0,00062 ^{ns}	0,9240	1,190	1,415	15,11	63,88	60,54
	b= 205,1386 ^{ns}						
	c= 0,9971**						
Henderson	a= 0,00049**	0,9237	1,152	1,328	15,33	58,55	61,05
	b= 0,9863**						

**Significativo a 1% pelo teste t. ^{ns}Não significativo pelo teste t.

Na modelagem matemática, buscam-se sempre modelos que apresentem o melhor ajuste possível aos dados experimentais. Com base nos parâmetros estatísticos e significância dos coeficientes a 1% pelo teste t (Tabela 3), apresentado neste trabalho, o modelo de Halsey Modificado pode ser utilizado para representar a higroscopicidade das sementes de canola para a faixa de temperatura de 10 a 40 °C e atividade de água variando de 0,2973 a 0,8770 (decimais).

Em relação ao coeficiente de determinação (R^2) todos os modelos ajustados apresentaram elevados valores ($R^2 > 0,8332$), sendo que o maior valor foi obtido para o modelo de Halsey Modificado ($R^2 = 0,9810$).

O coeficiente de determinação tem importante utilidade quando se compara modelos com número diferente de coeficientes (CANO-HIGUITA et al., 2015). Todavia, o coeficiente de determinação deve ser utilizado apenas como índice auxiliar e não como critério de avaliação de modelos não lineares (BOTELHO et al., 2010).

Para uma análise mais detalhada foram utilizados outros parâmetros estatísticos para respaldar a seleção do melhor modelo. Nota-se que o modelo de Halsey Modificado apresentou o melhor ajuste estatístico, com a menor magnitude do desvio padrão da estimativa ($SE = 0,596$) e do *Qui*-quadrado ($\chi^2=0,355$).

Constata-se também na Tabela 3 que dentre os modelos analisados, unicamente o modelo de Halsey Modificado se ajustou bem ao valor de P com 7,13%, que segundo Mohapatra & Rao (2005), o erro médio relativo acima de 10% indica que o modelo não representa satisfatoriamente o fenômeno estudado.

Para o método de AIC e do BIC, observado na Tabela 3, nota-se que o modelo de Halsey Modificado apresentou os menores valores, indicando que o modelo foi o mais satisfatório. Ferreira Junior et al. (2018), relatam a necessidade de incluir outros critérios de seleção para modelos que estimam as isotermas de dessorção. Esses autores aplicaram a metodologia do AIC e do BIC para a escolha do melhor modelo trabalhando com sementes de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. De acordo com Huisman et al. (2002) o melhor ajuste do modelo está atribuído aos menores valores do AIC e do BIC, que permitem a comparação de modelos não hierárquicos e penalizam modelos mais parametrizados.

Portanto, conforme esses fundamentos, o modelo de Halsey Modificado foi selecionado para representar as isotermas de dessorção das sementes de canola. De acordo com Halsey (1948), a equação do modelo de Halsey Modificado considera a

condensação da água da multicamada a distância relativamente grande da superfície sólida do produto. O modelo de Halsey Modificado é dependente da temperatura, pois, quanto maior a temperatura a qual o produto está submetido, maior é a pressão de vapor da água no interior. Oliveira et al. (2017b) estudando a higroscopicidade dos frutos de baru verificaram que o modelo de Halsey Modificado se ajustou melhor aos dados experimentais.

Verifica-se adequada correspondência entre os dados estimados pelo modelo escolhido (Halsey Modificado) e os observados experimentalmente para todas as temperaturas estudadas (10, 20, 30 e 40 °C) (Figura 1). Além disso, observa-se influência da temperatura sobre as isotermas de dessecção das sementes de canola, uma vez que, com o aumento da temperatura, para um valor constante de atividade de água, ocorre a redução do teor de água de equilíbrio, ou seja, para que o armazenamento das sementes de canola seja seguro em ambientes com temperaturas e atividades de água elevadas é necessária a redução do teor de água das sementes. Assim, as isotermas de sorção podem ser empregadas, para definir as épocas mais adequadas para o armazenamento da canola, considerando dados de temperatura e umidade relativa.

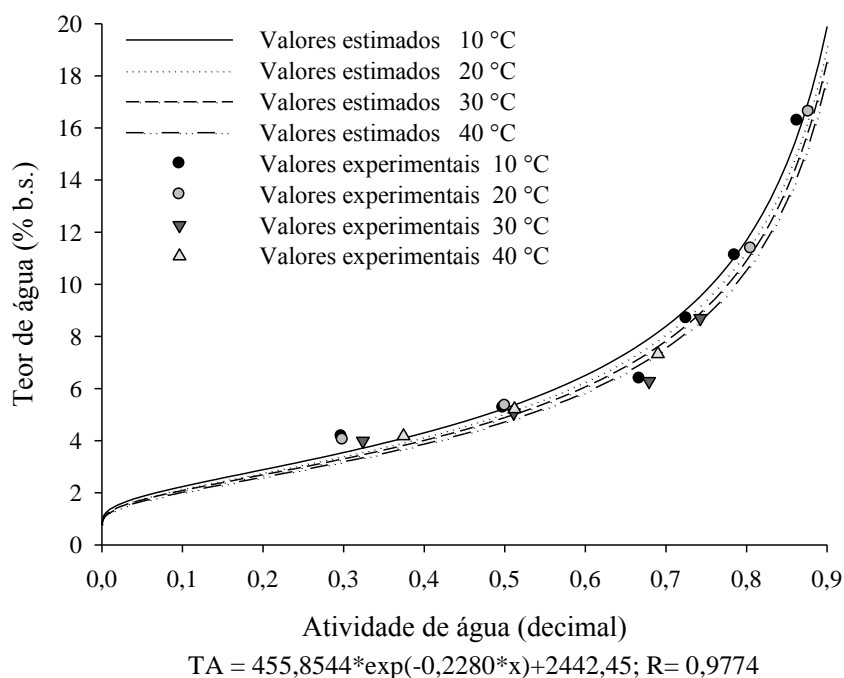


Figura 1 - Valores experimentais do teor de água de equilíbrio e isotermas de dessecção estimadas pelo modelo de Halsey Modificado para as sementes de canola (*Brassica napus* L.), em diferentes condições de temperatura e atividades de água.

Nota-se, ainda na Figura 1, que as isotermas de dessorção das sementes de canola estimadas pelo modelo de Halsey Modificado possuem formato sigmoidal com características de curvas do tipo II, seguindo a classificação de BET (BRUNAUER et al., 1938), considerada padrão para produtos agrícola. De acordo com esses autores, as isotermas que apresentam configurações do tipo II, procedem de adsorventes, em que existe ampla variação de tamanho de poros. Essa variação permite ao adsorvente a capacidade de avançar de forma contínua de uma adsorção da monocamada para multicamada, seguida de condensação capilar.

Tabela 4 – Valores do teor de água de equilíbrio (% b.s.) das sementes de canola (*Brassica napus* L.) híbrido Hyola 430 estimados pelo modelo de Halsey Modificado, em função da Temperatura (T) e da Umidade Relativa de Equilíbrio (URE).

URE (%)	T (°C)						
	10	15	20	25	30	35	40
30	3,54	3,48	3,42	3,36	3,30	3,24	3,19
32	3,69	3,62	3,56	3,49	3,43	3,37	3,31
34	3,83	3,76	3,70	3,63	3,57	3,51	3,44
36	3,98	3,91	3,84	3,78	3,71	3,64	3,58
38	4,14	4,07	3,99	3,92	3,85	3,79	3,72
40	4,30	4,22	4,15	4,08	4,01	3,94	3,87
42	4,47	4,39	4,31	4,24	4,16	4,09	4,02
44	4,65	4,57	4,49	4,41	4,33	4,25	4,18
46	4,84	4,75	4,67	4,58	4,50	4,43	4,35
48	5,03	4,94	4,86	4,77	4,69	4,61	4,52
50	5,24	5,15	5,06	4,97	4,88	4,80	4,71
52	5,46	5,36	5,27	5,18	5,09	5,00	4,91
54	5,70	5,60	5,50	5,40	5,31	5,21	5,12
56	5,95	5,84	5,74	5,64	5,54	5,44	5,35
58	6,21	6,11	6,00	5,89	5,79	5,69	5,59
60	6,50	6,39	6,28	6,17	6,06	5,95	5,85
62	6,82	6,70	6,58	6,46	6,35	6,24	6,13
64	7,16	7,03	6,91	6,79	6,67	6,55	6,44
66	7,53	7,40	7,27	7,14	7,01	6,89	6,77
68	7,94	7,80	7,66	7,53	7,39	7,26	7,14
70	8,39	8,24	8,10	7,95	7,81	7,68	7,54
72	8,89	8,73	8,58	8,43	8,28	8,14	7,99
74	9,46	9,29	9,13	8,97	8,81	8,66	8,50
76	10,10	9,92	9,75	9,58	9,41	9,24	9,08
78	10,83	10,64	10,46	10,27	10,09	9,92	9,74
80	11,69	11,49	11,28	11,09	10,89	10,70	10,51
82	12,70	12,48	12,26	12,05	11,84	11,63	11,42
84	13,92	13,68	13,44	13,20	12,97	12,74	12,52
86	15,43	15,16	14,89	14,63	14,37	14,12	13,87
88	17,35	17,04	16,74	16,45	16,16	15,88	15,60
90	19,89	19,54	19,20	18,86	18,53	18,21	17,89

Na Tabela 4, nota-se que a partir dos valores de unidade relativa de equilíbrio de 70% a diminuição da temperatura resulta em aumento no teor de água de equilíbrio. A partir do conhecimento da higroscopicidade pode-se recomendar o teor de água de equilíbrio das sementes de canola para um armazenamento seguro, considerando a temperatura e umidade relativa do ambiente de armazenagem, com o abjetivo de prevenir perdas resultantes de fungos ou reações que afetam diretamente a qualidade das sementes.

De acordo com Alcântara et al. (2009) os valores de teor de água de equilíbrio relacionam com o desenvolvimento de diversos microrganismos. O fungo *Aspergillus niger* é descrito por Pinto et al. (2006) como o microrganismo mais adaptável aos processos fermentativos, sendo em torno de 70% o valor da umidade relativa de equilíbrio mínima para o desenvolvimento de suas atividades metabólicas.

Os valores observados e estimados do calor isostérico integral de dessorção (Q_{st}) em função do teor de água de equilíbrio (% b.s.) estão apresentados na Figura 2. Constatase que à medida que o teor de água de equilíbrio da semente de canola reduz, o calor isostérico integral de dessorção aumenta exponencialmente. Ou seja, mais energia é necessário fornecer para a remoção da água que está fortemente ligada a estrutura do material. Esse elevado valor do calor isostérico integral de sorção para baixos valores de teor de água pode ser explicado pelas diferenças nas forças de ligação da água com a superfície adsorvente de um determinado produto, representada pelos valores do calor isostérico integral de dessorção, conforme observado para diversos produtos agrícolas.

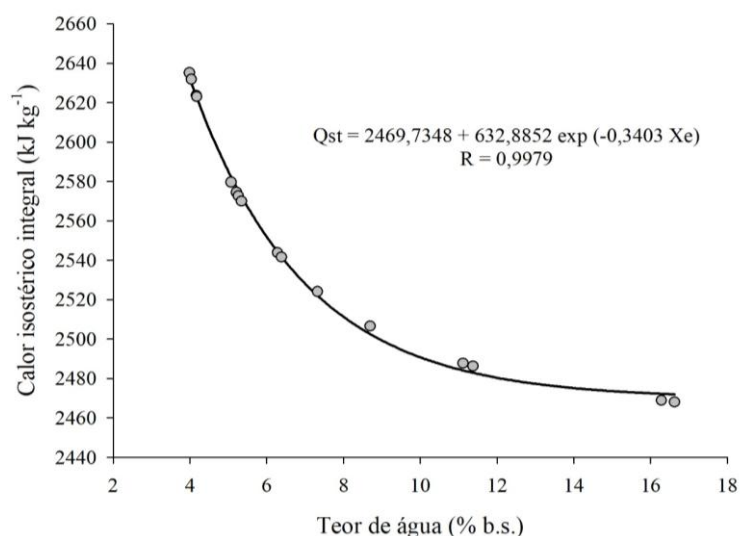


Figura 2- Valores experimentais e estimados do calor isostérico integral de dessorção em função do teor de água de equilíbrio para as sementes de canola (*Brassica napus* L.) em diferentes condições de temperatura e atividades de água.

Os Q_{st} para as sementes de canola na faixa do teor de água de equilíbrio de 3,99 a 16,62 (% b.s.) variaram de 2.640 a 2.460 kJ kg⁻¹. Sendo que as diferenças nos valores de Q_{st} dos variados produtos agrícolas estão relacionados com a composição química, faixa de temperatura trabalhada e teor de água. Conforme relatado para diversos produtos agrícolas, como crambe (COSTA et al., 2015b) sorgo-sacarino (ULLMANN et al., 2016), sucupira-branca (OLIVEIRA et al., 2017b), arroz vermelho (ASCHERI & BASTOS, 2015) e crambe (COSTA et al., 2013). Portanto, durante o fenômeno de dessorção, esse comportamento está relacionado com a mobilidade das moléculas de água. Há menos locais disponíveis para as ligações entre as moléculas com a elevada atividade de água, os quais implicam menor demanda de mobilidade das moléculas de água (GONELI et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2014; RESENDE et al., 2017).

CONCLUSÕES

O modelo de Halsey Modificado é o que melhor representa as isotermas de dessorção das sementes de canola.

Recomendam-se para armazenamento seguro da canola os teores de água de 7,94; 7,66; 7,39 e 7,14 para as temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C, respectivamente, com umidade relativa de equilíbrio de 68%.

Com a redução do teor de água de equilíbrio, ocorre aumento da energia necessária para a remoção de água nas sementes de canola, sendo que os valores do calor isostérico integral de dessorção para as sementes de canola na faixa do teor de água de equilíbrio de 3,99 a 16,62 (% b.s.) variaram de 2,640 a 2,460 kJ kg⁻¹.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano – Campus Rio Verde).

Ao Dr. Gilberto Omar Tomm, pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Trigo, pelo fornecimento das sementes de canola.

A CAPES, pela concessão de bolsa ao primeiro autor. Ao CNPq e à Finep, pelo apoio financeiro indispensável na execução do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transaction on Automatic Control**, v.19, p.716-723, 1974.

ALCÂNTARA, S.R.; ALMEIDA, F.A.C.; SILVA, F.L.H.; GOMES, J.P. Isotermas de adsorção do pedúnculo seco do caju. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.1, p.81-87, 2009.

ASCHERI, D.P.R.; BASTOS, S.M.C. Propiedades de adsorción de água de dos genótipos de arroz rojo. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.1, p.134–143, 2015.

BANDEIRA, T.P.; CHAVARRIA, G.; TOMM, G.O. Desempenho agrônômico de canola em diferentes espaçamentos entre linhas e densidades de plantas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 10, p. 1332-1341, 2013.

BOTELHO, F.M.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; MARTINS, M.A.; BAPTESTINI, F.M. Análise da hidratação do arroz na parboilização. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.30, p.713-718, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009. p.399.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P.H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layer. **Journal of American Chemistry Society**, v.60, n.2, p.309-312, 1938.

CANO-HIGUITA, D.M.; VILLA-VÉLEZ, H.A.; TELIS-ROMERO, J.; VÁQUIRO, H.A.; TELIS, V.R.N. Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: a thermodynamic approach. **Food and Bioproducts Processing**, v.93, p.19-28, 2015.

CASTRO, A.M.G.; LIMA, S.M.V.; SILVA, J.F.V. **Complexo agroindustrial de biodiesel no Brasil**: competitividade das cadeias produtivas de matérias-primas. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2010. 712 p.

CHEN, C.; WENG, Y.K. Moisture sorption isotherms of oolong tea. **Food and Bioprocess Technology**, v.3, n.2, p.226–233, 2010.

COSTA, .L.M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C.; SOUSA, K.A. Isotermas e calor isostérico de sementes de *Buchenavia capitata* (Vahl) Eichler. **Revista Ciência Agronômica**, v.46, n.3, p.516-523, 2015a.

COSTA, L.M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C. Determinação das isotermas de equilíbrio higroscópico de frutos de crambe pelo método dinâmico. **Bioscience Journal**, v.31, n.2, p.382-391, 2015b.

COSTA, L.M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C. Isotermas de dessorção e calor isostérico dos frutos de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.4, p.412–418, 2013.

FERREIRA JUNIOR, W.N.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C.; COSTA, L.M. Isotherms and Isosteric Heat Desorption of *Hymenaea stigonocarpa* Mart. Seeds. **Journal of Agricultural Science**, v.10, n.10, p. 504 – 512, 2018.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; AFONSO JÚNIOR, P.C. Water sorption properties of coffee fruits, pulped and green coffee. **Food Science and Technology**, v.50, n.2, p.386–391, 2013.

HALSEY, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. **Journal of Chemical Physics**, v.16, p.931-937, 1948.

HESSINI, L.; BETTAIEB, E.; DESMORIEUX, H.; TORRES, S.S.; TOUIL, A. Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds. **Industrial Crops and Products**, v.67, p.457-465, 2015.

HUISMAN, A.; VEERKAMP, R.; VAN ARENDONK, J. Genetic parameters for various random regression models to describe the weight data of pigs. **Journal of Animal Science**, v.80, n.3, p.575-82, 2002.

IGLESIAS, H.; CHIRIFE, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. **Journal of Food Technology**, v.11, n.2, p.109-116, 1976.

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

OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; COSTA, L.M.; FERREIRA JÚNIOR, W.N.; SILVA, I.O.F. Hygroscopicity of baru (*Dipteryx alata* Vogel) fruit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.4, p.279-284, 2017a.

OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; COSTA, L.M.; SILVA, G.P.; SALES, J.F. Hygroscopicity of 'sucupira-branca' (*Pterodon emarginatus* Vogel) fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.4, p.285-289, 2017b.

OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; SOUZA, K.A.; SMANIOTTO, T.A.S. Propriedades termodinâmicas das sementes de pinhão-mansão. **Bioscience Journal**, v.30, n.1, p.147-157, 2014.

PINTO, G.A.S.; BRITO, E.S.; ANDRADE, A.M.R.; FRAGA, S.L.P.; TEIXEIRA, R.B. Fermentação em estado sólido: uma alternativa para o aproveitamento e valorização de resíduos agroindustriais. *Revista de Química Industrial*, v. 74, n. 724, p. 17-20, 2006.

RAMOS, A.P.; GUERRERO, K.M.L.; ROMERO, J.T.; LOPES FILHO, J.F. Isotermas e calor isostérico de adsorção da água do amido de quinoa. **Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial**, v.15, n.1, p. 95-104, 2017.

RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C.; COSTA, L.M.; FERREIRA JÚNIOR, W.N. Thermodynamic Properties of Baru fruits (*Dipteryx alata* Vogel). **Engenharia Agrícola**, v.37, n.4, p.739–749, 2017.

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **Annals of Statistics**, v.6, p.461-464, 1978.

SILVA, H.W.; COSTA, L.M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C.; SOARES, R.S.; VALE, L.S.R. Higroscopicidade das sementes de pimenta (*Capsicum chinense* L.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.8, p.780–784, 2015.

SOUSA, K.A.; RESENDE, O.; COSTA, L.M. Isotermas de dessorção das sementes de nabo forrageiro obtidas pelos métodos dinâmico e estático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, p.216-222, 2013.

ULLMANN, R.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C.; COSTA, L.M.; CHAVES, T.H. Higroscopicidade das sementes de sorgo- sacarino. **Engenharia Agrícola**, v.36, n.3, p. 515–524, 2016.

WANG, N.; BRENNAN, J.G. Moisture sorption isotherm characteristics of potato at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, v.14, n.4, p.269-287, 1991.

CAPÍTULO IV

Comportamento mecânico das sementes de canola em função do teor de água

RESUMO – O comportamento mecânico de um material é importante, principalmente na especificação de cargas que ele pode suportar de maneira segura, ou de cargas que determinadas máquinas deverão exercer sobre o produto, para se obter resultado específico. Assim, objetivou-se, com este trabalho, analisar a influência do teor de água nos valores da força máxima de compressão e determinar o módulo proporcional de deformidade de sementes de canola submetidos a compressão. Foram utilizados sementes de canola, com teores de água de 0,162; 0,136; 0,111; 0,086; 0,063; 0,052 e 0,041 decimal b.s. As sementes foram submetidas aos esforços de compressão uniaxial entre duas placas paralelas, em uma máquina de ensaio universal de teste modelo “TA Hdi Texture Analyser”, com uma célula de carga de 250 N, e analisados individualmente em amostra de 15 sementes para cada teor de água. Para tanto utilizaram-se as deformações de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 e 2,0 ($\times 10^{-4}$ m). O módulo proporcional de deformidade aumenta com a redução do teor de água e da deformação do produto obtendo-se valores para a faixa de teor de água estudada, entre 1,48 a 8,13 ($\times 10^8$ N m⁻²). A redução do teor de água, resultou em aumento linear na força necessária para atingir o “bioyield point” de 9,97 a 8,74 N.

PALAVRAS-CHAVES: força de compressão, deformação, ruptura.

ABSTRACT – The mechanical behavior of a material is important, especially in specifying loads that it can withstand safely, or loads that certain machines must exert on the product, to obtain a specific result. So the objective with this job was to analyze the influence of the moisture content on the maximum compressive force values and to determine the proportional modulus of deformity of canola seeds subjected to compression. Canola seeds were used, with moisture content in (0.162; 0.136; 0.111; 0.086; 0.063; 0.052 and 0.041 decimal d.b.), subjected to uniaxial compression efforts between two parallel plates, in a model universal test machine “TA Hdi Texture

Analyser”, with a load cell of 250 N, and analyzed individually in a sample of 15 seeds for each moisture content. For this purpose, the deformations of 0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1.0; 1.2; 1.4; 1.6; 1.8 and 2.0 ($\times 10^{-4}$ m). The proportional module deformity increases with the reduction of the moisture content and deformation of the product obtaining values for the range of moisture content studied between 1.48 to 8.13 ($\times 10^8$ N m⁻²). The moisture content reduction, resulted in linear increase in force necessary to achieve the “bioyield point” from 9.97 to 8.74 N.

KEYWORDS: force of compression, deformation, break.

INTRODUÇÃO

A canola (*Brassica napus* L. var. oleifera) é uma cultura típica de clima temperado, sendo uma oleaginosa pertencente à família Brassicaceae. Cultura de elevada importância, pois vem sendo implantada como alternativa de rotação de culturas e também de produção rentável (BATTISTI et al., 2013).

A canola é uma das principais oleaginosas da agricultura mundial. A semente constitui importante fonte de óleo vegetal comestível e de energia renovável (BANDEIRA et al., 2013). Além de produção de óleo para consumo humano e de biodiesel, outro subproduto importante é o farelo, que possui de 34 a 38% de proteínas e é utilizado para a formulação de rações (MICUANSKI, 2014).

De acordo com Couto et al. (2002), as sementes são submetidas, desde a colheita até o destino final, aos vários processos que envolvem uma série de tratamentos mecânicos como impacto de alta velocidade, causando escoriações, esmagamento e trincas, aumentando a sua suscetibilidade a deterioração durante o armazenamento. O comportamento mecânico de um material é importante, principalmente na especificação de cargas que ele pode suportar de maneira segura, ou de cargas que determinadas máquinas deverão exercer sobre o produto, para se obter um resultado específico.

Segundo Ribeiro et al. (2007) a partir das curvas de “força-deformação”, obtidas a partir do teste de compressão, podem-se obter parâmetros que caracterizam a resposta do material quando submetido a uma carga. No caso de corpos convexos (sementes, frutos e vegetais intactos), a determinação do módulo de elasticidade por meio das curvas de “força-deformação”, obtidas de testes de compressão entre placas paralelas, torna-se mais complexa. O contorno convexo do produto faz com que as áreas de

contato entre o material e as placas variem de acordo com a deformação do produto (RIBEIRO et al., 2007).

Diversos fatores afetam as propriedades mecânicas dos produtos agrícolas destacando-se, entre eles, a temperatura de secagem, o teor de água, o tipo de força e a região do grão na qual a força é aplicada (ZHANG et al., 1989).

Assim, objetivou-se, com este trabalho, analisar a influência do teor de água nos valores da força máxima de compressão e determinar o módulo proporcional de deformidade e força de ruptura das sementes de canola submetidos à compressão.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Pós-colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde (IF Goiano - Campus Rio Verde).

Foram utilizadas sementes de canola (*Brassica napus* L.) híbrido Hyola 430, colhidos manualmente na área experimental de olericultura do IF Goiano - Campus Iporá, com teor de água inicial de 0,162 (b.s.). Os teores de água das sementes foram determinados por gravimetria utilizando-se a estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$, durante 24 h, em duas repetições (BRASIL, 2009). Para cada teor de água obtido (0,162; 0,136; 0,111; 0,086; 0,063; 0,052 e 0,041 decimal b.s.) as amostras foram homogeneizadas e encaminhadas para o teste de compressão.

A resistência à compressão foi realizada por meio de ensaios individuais de compressão uniaxial, em amostra de 15 sementes para cada teor de água. Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio universal de teste modelo “TA Hdi Texture Analyser”, utilizando-se uma célula de carga de 250 N.

As sementes foram comprimidas em sua posição natural de repouso, ou seja, no sentido da espessura, menor eixo (Figura 1) a velocidade constante (taxa de aplicação de força) de $0,001 \text{ m s}^{-1}$.

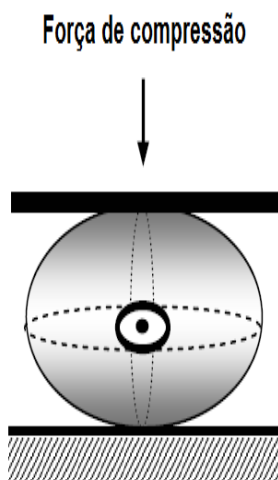


Figura 1 - Orientação das sementes de canola durante os ensaios de compressão (menor eixo- espessura). **Fonte:** Adaptado de Resende et al. (2007).

Após a aquisição dos dados foram confeccionadas curvas de força de compressão em função da deformação das sementes para cada teor de água estudado com o auxílio do software Sigma Plot 11.0. Para tanto, utilizaram-se as deformações de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 e 2,0 ($\times 10^{-4}$ m). Também foram confeccionadas curvas teor de água \times força de compressão para cada deformação avaliada.

Determinou-se o módulo proporcional de deformidade por meio da equação 1, conforme Batista et al. (2003).

$$E_p = \frac{0,531 \times F}{D^{3/2}} \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (1)$$

em que:

E_p : módulo proporcional de deformidade, Pa;

F: força de compressão, N;

D: deformação total (elástica e plástica) do corpo nos pontos de contato com a placa superior e inferior, m;

R, r: raios de curvatura no ponto de contato, m.

Os raios de curvatura (r e R) das sementes foram obtidos no ponto de contato por meio de ajustes de circunferência às curvaturas do corpo, segundo o plano coordenado da posição de compressão, conforme ilustrado na Figura 2.

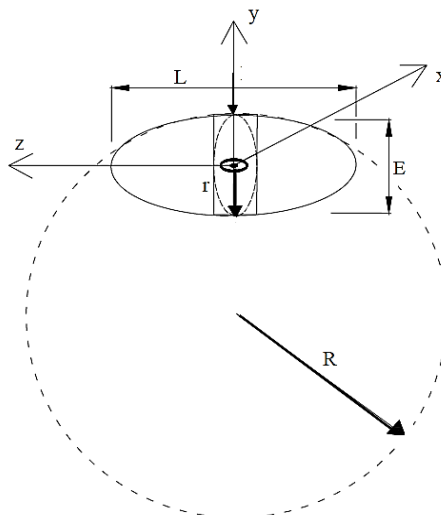


Figura 2 - Raios de curvatura das sementes de canola (r e R) na região de contato entre o produto e a placa de compressão. L = comprimento, E = espessura.

Fonte: Adaptado de Resende et al. (2007).

O ensaio foi conduzido no delineamento inteiramente ao acaso com as 10 deformações avaliadas. Os dados foram analisados por meio de análise de variância e regressão e o modelo foi selecionado baseando-se na significância dos coeficientes de regressão, pelo teste de “t” e se adotando o nível de 5% de significância, na magnitude do coeficiente de determinação e ainda, no conhecimento da evolução do fenômeno biológico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3, encontram-se os valores médios da força máxima necessária a compressão nas sementes de canola, em função do teor de água (decimal b.s.) para as diversas deformações. Verifica-se que houve redução na força de compressão necessária para deformar as sementes de canola com o aumento do teor de água. Nota-se ainda um aumento da força com o acréscimo da deformação, com valor em torno de 0,46 N para deformação de $0,2 \times 10^{-4}$ m para o teor de água de 0,162 (b.s.) e de 5,91 N para deformação de $2,0 \times 10^{-4}$ m e no teor de água de 0,041 (b.s.).

Comportamento semelhante foi constatado por Fernandes et al. (2014) e Corrêa et al. (2008), estudando a influência do teor de água nas propriedades mecânicas das sementes de trigo e feijão.

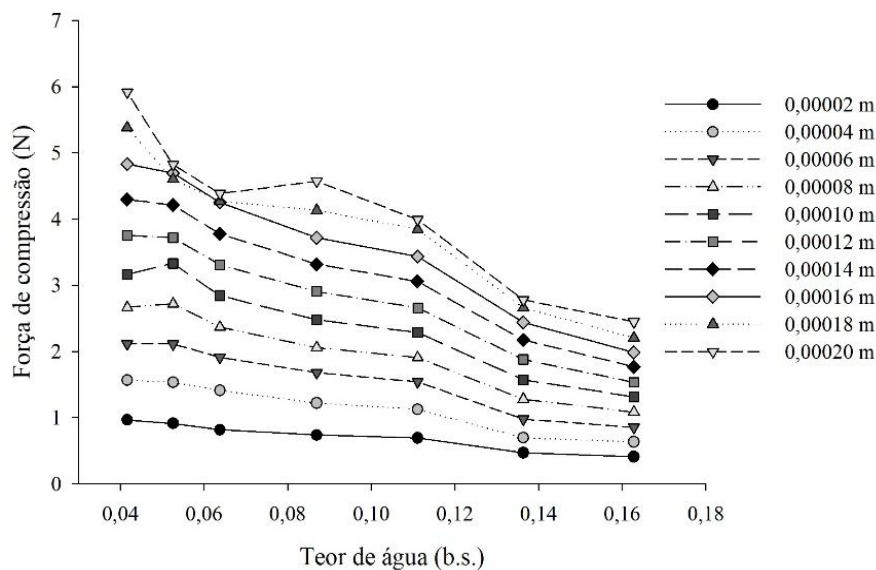


Figura 3 - Valores médios da força máxima de compressão, em função do teor de água para as deformações de $0,2 \times 10^{-4}$; $0,4 \times 10^{-4}$, $0,6 \times 10^{-4}$, $0,8 \times 10^{-4}$, $1,0 \times 10^{-4}$, $1,2 \times 10^{-4}$, $1,4 \times 10^{-4}$, $1,6 \times 10^{-4}$, $1,8 \times 10^{-4}$ e $2,0 \times 10^{-4}$ m para as sementes de canola (*Brassica napus* L.).

As sementes com teor de água mais elevados oferecem menor resistência a compressão e aumentam proporcionalmente com a redução do teor de água e da deformação (OLIVEIRA et al., 2017). Segundo Gupta & Das (2000), essa tendência deve-se, possivelmente, a uma mudança gradual na integridade da matriz celular com a redução do teor de água.

Para análise do módulo proporcional de deformidade utilizaram-se os valores médios do raio de curvatura, referentes a todos os teores de água, com valores de 0,93 e 0,86 ($\times 10^{-3}$ m), respectivamente para R e r.

Na Figura 4, têm-se as superfícies de resposta ajustadas para o módulo proporcional de deformidade das sementes de canola, em função do teor de água e da deformação.

Os valores do módulo proporcional de deformidade aumentam com a redução do teor de água e da deformação. Os valores de módulo proporcional de deformidade apresentaram variação de 1,48 a $8,13 \times 10^8$ N m⁻²). Esses resultados foram menor que os observados por Sousa et al. (2018) que obtiveram o módulo proporcional de deformidade de sementes de *Raphanus sativus* L entre 0,11 a $1,72 \times 10^{10}$ Pa).

Tendências semelhantes foram encontradas por Resende et al. (2007) e Oliveira et al. (2017), para sementes de feijão e frutos de baru, respectivamente. De acordo com

Batista et al. (2003) o valor elevado de deformação diz-se que uma força maior deve ser aplicada ao produto para ocorrer a deformação.

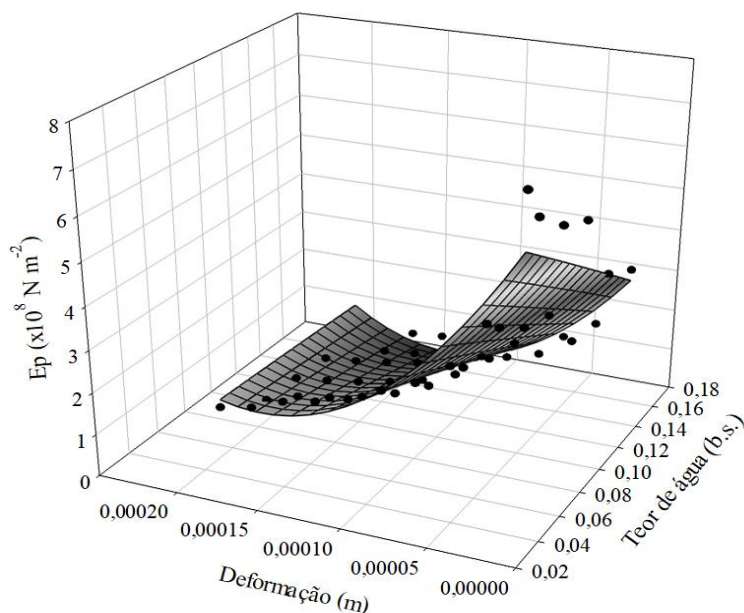


Figura 4 - Valores médios do módulo proporcional de deformidade (E_p) das sementes de canola (*Brassica napus* L.) para cada teor de água, em função do teor de água e da deformação.

Na Tabela 1, está apresentada a equação de regressão ajustada aos valores experimentais do módulo proporcional de deformidade (E_p) das sementes de canola em função do teor de água, (X) e da deformação (D). A equação ajustada demonstra satisfatoriamente os dados experimentais, apresentando alto valor do coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 1 - Modelos ajustados aos valores experimentais do módulo proporcional de deformidade da canola (E_p) em função do teor de água (X) e da deformação (D).

Modelo	R^2
$E_p = 8,7999 - 29,0374.X - 75922,1986.D - 3,4193.X^2 + 196241727,9506.D^2 + 139119,5422.X.D$	0,9129*

*Significativo a 1% pelo teste F.

Os valores das forças (N) médias necessárias para iniciar a ruptura das sementes de canola submetidos à compressão uniaxial em função do teor de água estão ilustrados na Figura 5. A redução do teor de água, devido ao processo de secagem, resultou em aumento linear na força necessária a ruptura do tegumento das sementes de canola.

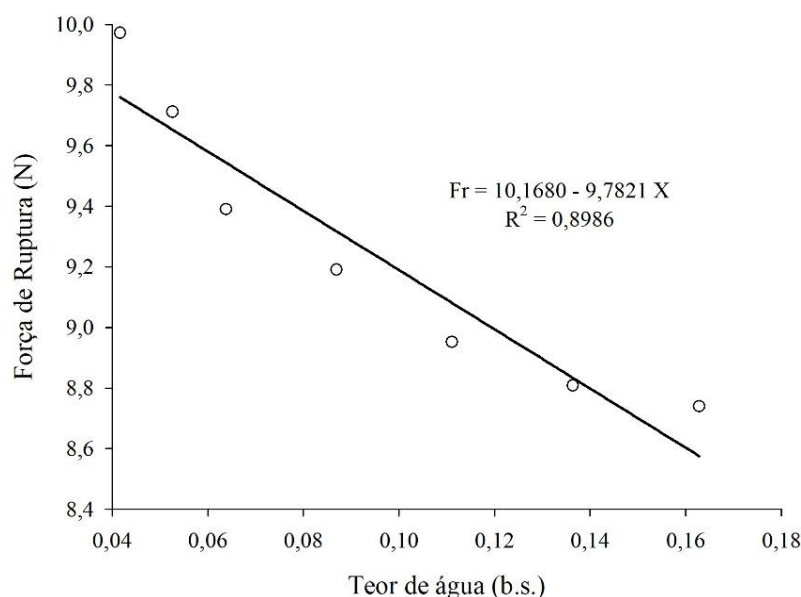


Figura 5 - Valores médios da força de ruptura em função do teor de água, para sementes de canola (*Brassica napus* L.).

A força de ruptura das sementes de canola variou de 8,74 a 9,97 N, aumentando linearmente com a redução do teor de água (Figura 5). Estes resultados ocorrem pelas mudanças celulares geradas pela redução do teor de água.

De acordo com Oliveira et al. (2017), esse comportamento pode estar relacionado com o adensamento celular que ocorre com a saída de água durante o processo de secagem, ou seja, as células se aproximam e, conseqüentemente, terá maior resistência à compressão em teores de água mais baixos.

Os resultados corroboram com outros obtidos por pesquisadores que trabalharam com de diferentes produtos agrícolas (SAIEDIRAD et al., 2008; SHARMA et al., 2009; RESENDE et al., 2013).

CONCLUSÕES

A força de compressão necessária para deformação das sementes de canola diminui com o aumento do teor de água.

Os valores do módulo proporcional de deformidade aumentam com a redução do teor de água e da deformação. A redução do teor de água eleva a força necessária à ruptura

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano – Campus Rio Verde).

Ao Dr. Gilberto Omar Tomm, pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Trigo, pelo fornecimento das sementes de canola.

A CAPES, pela concessão de bolsa ao primeiro autor. Ao CNPq e a Finep, pelo apoio financeiro indispensável na execução do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

BANDEIRA, T.P.; CHAVARRIA, G.; TOMM, G.O. Desempenho agrônômico de canola em diferentes espaçamentos entre linhas e densidades de plantas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.10, p.1332-1341, 2013.

BATISTA, C.S.; COUTO, S.M.; CECON, P.R.; PEIXOTO, A.B. Efeito da temperatura do ar de secagem, do teor de umidade e do estágio de maturação no módulo de deformidade de frutos de café (*Coffea arabica* L.). **Revista Brasileira de Armazenamento**, Especial café, n.6, p.42-53, 2003.

BATTISTI, R.; PILAU, F. G.; SCHWERZ, L.; SOMAVILLA, L.; TOMM, G. O. Dinâmica floral e abortamento de flores em híbridos de canola e mostarda castanha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 2, p. 174-181, fev. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009. p.399.

CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D.M.; JARÉN, C.; ARAZURI, S. Resistance of edible beans to compression. **Journal of Food Engineering**, v.86, n.2, p.172-177, 2008.

COUTO, S.A.; BATISTA, C.S.; PEIXOTO, A.B.; DEVILLA, I.A. Comportamento mecânico de frutos de café: módulo de deformidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 285-294, 2002.

FERNANDES, L.S.; CORRÊA, P.C.; DINIZ, M.D.M. S.; LEITE, D.M.; VASCONCELLOS, D.S.L. Influência do teor de água nas propriedades mecânicas dos grãos de trigo submetidos à compressão. **Bioscience Journal**, v. 30, suplemento 1, p. 219-223, 2014.

GUPTA, R.K.; DAS, S.K. Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading. **Journal of Food Engineering**, v.46, n.2, p.1-8, 2000.

MICUANSKI, V.C; A cultura energética: Canola (*Brassica napus* L.). **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 3, p.141-149, 2014.

OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; DEVILLA, I.A. Mechanical properties of baru fruit (*Dipteryx alata* Vogel). **Semina: Ciências Agrárias**, v.38, n.1, p.185-196, 2017.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; FIGUEIREDO NETO, A. Comportamento mecânico dos grãos de feijão submetidos a compressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.4, p.404-409, 2007.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; GONELI, A.L.D.; JARÉN, C. Mechanical properties of rough and dehulled rice during drying. **International Journal of Food Studies**, v.2, n.2, p.158-166, 2013.

RIBEIRO, D.M.; CORRÊA, P.C.; FURTADO, B.F.; GONELI, A.D.L.; RESENDE, O. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, p.493-500, 2007.

SAIEDIRAD, M.H.; TABATABAEEFAR, A.; BORGHEI, A.; MIRSALEHI, M.; BADIL, F.; VARNAMKHASTI, M. G. Effects of moisture content, seed size, loading rate and seed orientation on force and energy required for fracturing cumin seed (*Cuminum cyminum* Linn.) under quasi-static loading. **Journal of Food Engineering**, v.86, n.4, p.565-572, 2008.

SHARMA, R.; SOGI, D. S.; SAXENA, D. C. Dehulling performance and textural characteristics of unshelled and shelled sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds. **Journal of Food Engineering**, v.92, n.1, p.1-7, 2009.

SOUSA, K.A.; RESENDE, O.; ULLMANN, R.; SMANIOTTO, T.A.S. Mechanical properties of *Raphanus sativus* L. seeds. **Revista Ciência Agronômica**, v.49, n.3, p.437-442, 2018.

ZHANG, Q.; LI, Y.; PURI, V. M.; MANBECK, H. B. Physical properties effect on stress-strain behavior of wheat en masse – Part II. Constitutive elastoplastic parameter dependence on initial bulk density and moisture content. **Transactions of the ASAE**, v.32, n.1, p.203-209, 1989.

CONCLUSÃO GERAL

O tempo de secagem é reduzido com o aumento da temperatura, sendo de 10,83 horas para a temperatura de 40 °C e de 1,5 horas para a temperatura de 100 °C.

O modelo de Page foi selecionado para representar a secagem das sementes de canola.

O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura, sendo descrito pela equação de Arrhenius, com energia de ativação de 33,94 kJ mol⁻¹.

As temperaturas de secagem e o tempo de armazenamento influenciam na qualidade fisiológica das sementes de canola.

A germinação total e a germinação do teste a frio das sementes de canola na secagem de 40°C manteve ao longo do armazenamento acima de 70%, apresentando-se como dentro do padrão básico de comercialização de sementes de canola, de acordo com a Instrução Normativa nº 45 MAPA - 2013.

As sementes de canola se desenvolvem melhor em baixas temperaturas, com maior vigor quando comparado ao teste padrão de germinação.

O modelo de Halsey Modificado é o que melhor representa as isotermas de dessecção das sementes de canola.

Recomendam-se para armazenamento seguro da canola os teores de água de 7,94; 7,66; 7,39 e 7,14 para as temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C, respectivamente, com umidade relativa de equilíbrio de 68%.

Com a redução do teor de água de equilíbrio ocorre aumento da energia necessária para a remoção de água nas sementes de canola, sendo que os valores do calor isostérico integral de dessecção para as sementes de canola na faixa do teor de água de equilíbrio de 3,99 a 16,62 (% b.s.), variaram de 2.640 a 2.460 kJ kg⁻¹.

A força de compressão necessária para deformação das sementes de canola diminui com o aumento do teor de água.

Os valores do módulo proporcional de deformidade aumentam com a redução do teor de água e da deformação. A redução do teor de água eleva a força necessária a ruptura.