

## ANÁLISE DO PROCESSO DE SECAGEM DA SEMENTE DE CORNICHÃO (*Lotus corniculatus* L.) REUMIDIFICADA EM LEITO FIXO

BRITO, A. \*, PINHEIRO, G., PAULINO, L., THOLOZAN, L. DAMBROS, V.  
Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia Química  
E-mail: \*andriellybrito.aluno@unipampa.edu.br

**RESUMO** – O cornichão (*Lotus corniculatus* L.) é uma semente forrageira cultivada principalmente no Rio Grande do Sul, sendo de grande importância principalmente para o setor de agropecuária. No plantio dessa semente, é importante avaliar a umidade do material, visto que esse parâmetro influencia o cultivo. Dessa forma, esse trabalho investigou a secagem de sementes de cornichão em leito fixo a 50 °C com fluxo de ar constante. As sementes foram caracterizadas em função da umidade ( $U_{bu}$ ) e, posteriormente, foram realizados ensaios de cinética. O valor médio de  $U_{bu}$  obtido inicialmente foi de 20,12%. Nos ensaios de cinética o modelo que melhor se ajustou foi o de Page, com constante de secagem igual a 0,015  $\text{min}^{-1}$ . O valor da atividade de água ( $a_w$ ) foi de 0,0014 e os comportamentos de umidade em função do tempo e taxa de secagem estiveram de acordo com a literatura. De acordo com os dados obtidos pode-se afirmar que o processo de secagem em leito fixo foi efetivo para a diminuição de umidade das sementes e que o estudo de processos em maior escala devem apresentar potencial promissor.

### INTRODUÇÃO

Cornichão (*Lotus corniculatus* L.) é uma leguminosa forrageira de alto valor nutricional e uma elevada resistência a solos acidificados. Quando cultivadas apresentam raízes pivotantes, multiplicação por sementes e porte ereto (DO COUTO GARCIA; LEITES; PEREIRA DE MENEZES, 2018). Em um cenário nacional, o plantio desta espécie encontra-se predominantemente na região sul do país, destacando o estado do Rio Grande do Sul, como uma alternativa de forragem adaptada no período de clima frio (EMBRAPA, 2014). No entanto, a umidade presente nesse material pode ocasionar limitação no manejo e cultivo.

Neste contexto, a secagem dos grãos surge como uma alternativa de tratamento antes do cultivo. A secagem é uma operação unitária designada para a retirada de um líquido de uma matriz sólida por meio da evaporação. O ar não-saturado entra em contato com a matriz sólida,

desse modo há uma transferência simultânea de calor e contato com o ar insaturado sofre uma transferência simultânea de calor e de massa, gerando uma perda de umidade no material, ao mesmo tempo em que o ar se umidifica (MELLADO, 2007). Há dois mecanismos que governam a secagem: a convecção e a difusão. Do interior do sólido até o limite da camada externa temos os efeitos da difusão e da camada externa para fora temos os efeitos convectivos. Esse processo continua promovendo o aquecimento do material sólido juntamente com a perda umidade até atingir a umidade de equilíbrio (FOUST *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2012).

Embora existam várias técnicas de secagem de materiais orgânicos, as condições e equipamentos a serem utilizados são aqueles que causam o menor impacto fisiológico. Secagem em leito fixo possibilita que a colheita seja antecipada, além de reduzir as perdas no

campo, causadas pelas mudanças climáticas e agentes biológicos (KANNAN *et al.*, 2015).

Com isso, o objetivo deste trabalho foi estudar a variação da umidade do cornichão durante o processo de secagem, em leito fixo com escoamento de ar paralelo, mediante ajustes propostos na literatura, a fim de otimizar o beneficiamento do material.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) reumidificadas utilizadas neste estudo (Figura 1) foram fornecidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Pecuária Sul) na cidade de Bagé, Rio Grande do Sul.

Figura 1 - Sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.).



Fonte: Autores (2022)

### Caracterização das sementes de cornichão

A caracterização das sementes foi realizada a partir da análise do teor de umidade das amostras, feito em duplicata. As sementes de cornichão foram pesadas e submetidas a aquecimento em estufa (NOVA ÉTICA, MODELO 400-5 ND) a 105 °C por 24 h. Posteriormente, as amostras secas foram pesadas em balança analítica, possibilitando o cálculo da massa de água evaporada e umidade em base úmida e seca das sementes através das Equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$m_{\text{água}} = m_{\text{amostra}} - m_{\text{as}} \quad (1)$$

$$U_{bu} = \left( \frac{m_{au} - m_{as}}{m_{au}} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

$$U_{bs} = \left( \frac{m_{au} - m_{as}}{m_{as}} \right) \quad (3)$$

em que  $m_{\text{água}}$  é a massa de água evaporada (g),  $m_{\text{amostra}}$  é a massa da amostra presente na bandeja,  $m_{\text{au}}$  é a massa da amostra úmida (g),  $m_{\text{as}}$  é a massa da amostra seca (g),  $U_{bu}$  é a

umidade em base úmida (%) e  $U_{bs}$  é a umidade em base seca (gH<sub>2</sub>O/gsólido seco).

### Cinética de secagem das sementes em leito fixo com fluxo de ar paralelo

Os ensaios de cinética de secagem em leito fixo foram realizados em um secador de bandeja com escoamento de ar paralelo (ECO Educacional), ilustrado na Figura 2, com velocidade de escoamento de ar de 2 m s<sup>-1</sup> a 50°C. Foi observada a perda de massa do equipamento ao longo do tempo (0 - 170 min), assim como a variação das temperaturas de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) e bulbo úmido ( $T_{bu}$ ).

Figura 2 - Secador de bandeja com escoamento de ar paralelo.



Fonte: Autores (2022)

As sementes foram distribuídas em uma bandeja de acrílico com 8,70 cm de diâmetro e 0,98 cm de altura (Figura 3), inserida no interior do equipamento (Figura 4).

Figura 3 - Bandeja de acrílico com sementes de cornichão.



Fonte: Autores (2022)

Figura 4 - Bandeja inserida no interior do secador.



Fonte: Autores (2022)

Através dos dados obtidos no ensaio de cinética, obteve-se os ajustes nos modelos semi-empíricos presentes na literatura, representados pelas Equações 4, 5 e 6.

$$\frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt^n) \quad (4)$$

$$\frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = a_1 \exp(-kt) + b_1 \exp(-k_0 t) + c_1 \exp(-k_1 t) \quad (5)$$

$$\frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = a \exp(-kt^n) + bt \quad (6)$$

em que  $X_t$  é a umidade ao longo do tempo (gH<sub>2</sub>O/gdesólido seco),  $X_e$  é a umidade em equilíbrio (gH<sub>2</sub>O/gdesólido seco),  $X_0$  é a umidade no tempo inicial (gH<sub>2</sub>O/gdesólido seco),  $k$ ,  $k_0$ ,  $k_1$  são a constante de secagem (min<sup>-1</sup>),  $t$  é o tempo (min),  $n$  é o parâmetro do ajuste,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $a$ ,  $b$ , são constante dos modelos.

### Parâmetros da secagem

Através da temperatura de secagem (Tsec) e umidade absoluta (Uabs) obtidas através da leitura no equipamento de leito fixo, estimou-se a umidade relativa de secagem através do software CATT 3.

O cálculo da atividade de água ( $a_w$ ) foi realizado através da Equação 7.

$$a_w = \frac{UR}{100} \quad (7)$$

em que  $a_w$  é a atividade de água e  $UR$  é a umidade relativa de secagem (%).

As constantes e equações utilizadas para o cálculo da umidade de equilíbrio ( $X_e$ ) foram obtidas por meio dos estudos realizados por Kanaan (2014), que analisou as isotermas de secagem de cornichão a 50 °C, obtendo o melhor ajuste para o modelo de Peleg, representado pela Equação 8

$$X_e = k_1 a_w^{n_1} + k_2 a_w^{n_2} \quad (8)$$

em que  $X_e$  é a umidade em equilíbrio,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $n_1$  e  $n_2$  são constantes da equação.

O cálculo da umidade ao longo do tempo ( $X_t$ ) foi obtido através da Equação 9.

$$X_t = \frac{m_{\text{água}}}{m_{ss}} \quad (9)$$

em que  $m_{\text{água}}$  é a massa de água evaporada (g) e  $m_{ss}$  é a massa de sólido seco (g).

O cálculo do adimensional de umidade foi realizado a partir da Equação 10.

$$\theta = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (10)$$

em que  $\theta$  é adimensional de umidade,  $X_t$  é a umidade ao longo do tempo no tempo (gH<sub>2</sub>O/gdesólido seco),  $X_e$  é a umidade de equilíbrio (gH<sub>2</sub>O/gdesólido seco) e  $X_0$  é a umidade no tempo inicial (gH<sub>2</sub>O/gdesólido seco).

A variação da umidade livre do produto pelo tempo foi obtida através das Equações 11 e 12.

$$\frac{dx}{dt} = -A \quad (11)$$

$$\frac{dx}{dt} = -AB \exp(-Bt) \quad (12)$$

em que  $A$  é o coeficiente angular dos que correspondem a parte linear do gráfico da umidade livre em função do tempo,  $B$  é o coeficiente obtido através da parte exponencial do gráfico da umidade livre em função do tempo e  $t$  é o tempo (min).

A taxa de secagem foi calculada através da Equação 13.

$$N = -\frac{m_{ss}}{A} \frac{dx}{dt} \quad (13)$$

em que  $N$  é a taxa de secagem,  $m_{ss}$  é a massa de sólido seco (g) e  $A$  é a área da bandeja (m<sup>2</sup>).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Umidade em base úmida

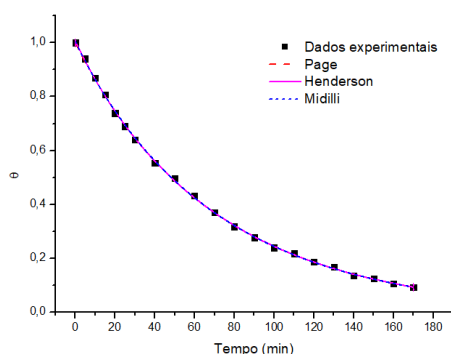
O valor de  $U_{bu}$  obtido para as sementes analisadas foi de 20,11±0,3. Esse valor é considerado fora da faixa indicada (10 a 12 %) para a comercialização de sementes (KANAAN, 2014; MACEDO *et al.*, 1987). O valor elevado de  $U_{bu}$  pode ser atribuído ao fato de que a matéria-prima utilizada no presente estudo foi submetida a diversos processos de reumidificação, o que pode acarretar em modificações no material (FERREIRA, 2003).

Chicaroni (1999) reportou mudanças fisiológicas na semente de Brichiária (*Brachiaria brizantha*) ao submetê-la a processos sucessivos de reumificação (CHICORONI, 1999).

### Ajustes cinéticos dos modelos semi-empíricos

Os ajustes dos dados experimentais aos modelos de cinética estão apresentados na Figura 5. A Tabela 1 apresenta os dados obtidos através dos ajustes.

Figura 5 - Curvas cinéticas e modelos semi-empíricos.



Fonte: Autores (2022)

Tabela 1 - Dados dos ajustes dos modelos cinéticos.

Parâmetros	Valores	Modelo
k (min <sup>-1</sup> )	0,015	Page
n	0,977	
R <sup>2</sup>	0,999	
X <sup>2</sup>	3,705	
a	0,481	Henderson
b	0,049	
c	0,476	
k (min <sup>-1</sup> )	0,013	
k0 (min <sup>-1</sup> )	0,053	
k1 (min <sup>-1</sup> )	0,013	
R <sup>2</sup>	0,999	

X <sup>2</sup>	3,903	
a	1,006	Midilli
b	-0,00001	
k(min <sup>-1</sup> )	0,016	
n	0,963	
R <sup>2</sup>	0,999	
X <sup>2</sup>	3,768	

Fonte: Autores (2022)

A Figura 5 indica que as curvas de cinética obtidas neste estudo apresentaram um comportamento decrescente do teor de água livre em função do tempo, o que está de acordo com a literatura (FOUST, 1982). De acordo com a Tabela 1, todos os modelos apresentaram bom ajuste aos dados experimentais, com altos valores de coeficiente de correlação (R<sup>2</sup>). No entanto, o modelo que melhor ajustou-se aos dados experimentais foi o de Page, apresentando maiores valores para R<sup>2</sup> e X<sup>2</sup>. Dessa forma, a constante de secagem (k) utilizada para a obtenção de outros parâmetros foi de 0,015.

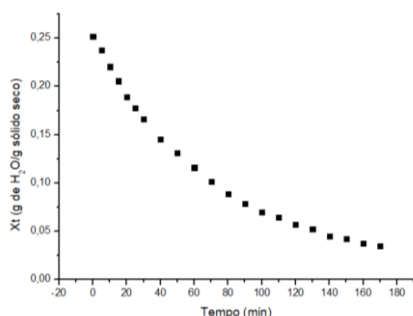
### Parâmetros da secagem

O valor obtido para  $a_w$  foi de 0,0014. Esse valor representa a umidade relativa de secagem do material, que, como já era esperado, se manteve constante devido às condições de temperatura escolhidas serem também constantes. Esse parâmetro é afetado pela mudança de temperatura de forma que, em temperaturas mais elevadas, a atividade de água é reduzida, fazendo com que a umidade do produto final seja mais baixa em temperaturas menos elevadas (KANAAAN, 2014).

Os valores de  $X_t$  estão ilustrados na Figura 6. O comportamento decrescente ao longo do tempo está de acordo com estudos que avaliaram o processo de secagem de folhas de menta, folhas de aroeira e banana maçã (GASPARIN; CHRIST; COELHO, 2017; DOYMAZ, 2006; GONELI, 2014). Esse comportamento decrescente sem taxa constante se deve ao fato de que a secagem é controlada pelo fenômeno de difusão interna da água livre até a superfície do material, onde a secagem

passa a ocorrer por convecção (GASPARIN; CHRIST; COELHO, 2017).

Figura 6 - Variação da umidade em função do tempo.

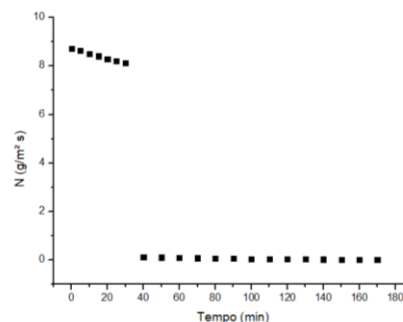


Fonte: Autores (2022)

Esse comportamento decrescente foi também observado para o parâmetro de  $\theta$ , apresentado na Figura 5. Esse desempenho decrescente ao longo do tempo está de acordo com a literatura e, além disso, já foi constatado através de estudos que o aumento da temperatura e velocidade de secagem promoveram um processo mais rápido, visto que a força de secagem se torna maior nessas condições (KANAN, 2014).

A variação da taxa de secagem ( $N$ ) está presente na Figura 7. O comportamento constante no início do processo ocorre porque os fenômenos de transferência de calor e massa são proporcionais, pois o calor fornecido para o sistema é totalmente utilizado para remover a água livre do material. Enquanto a temperatura do material não se modifica, a taxa de secagem apresenta-se como uma reta (CAVARIANI, 1996). Quando a umidade crítica é atingida, a difusão de água para a superfície deixa de ser equivalente à taxa evaporativa e a temperatura do sólido diminui. Por fim, a quantidade de água no sólido diminui, assim como sua temperatura, que passa a se aproximar da temperatura de secagem até atingir o equilíbrio (FOUST *et al.*, 1982; CHIRIFE, 1983).

Figura 7 - Variação da taxa de secagem em função do tempo.



Fonte: Autores (2022)

## CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no estudo da secagem das sementes de cornichão apresentaram uma eficiência, visto que a  $U_b$  e  $U_u$  foram menores, para um momento final de secagem, indo de 0,25 gH<sub>2</sub>O/g sólido seco para 0,089 gH<sub>2</sub>O/g sólido seco e de 20,12% para 8,18%, respectivamente. Além disso, as taxas de secagem foram decrescentes no estudo de cinética. Os ajustes através dos modelos escolhidos, Page, Henderson e Midilli, comportaram-se bem conforme descrito na literatura.

## REFERÊNCIAS

CAVARIANI, Cláudio. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar**. 1996. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1996. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-20210104-163748/publico/CavarianiClaudio.pdf>. Acesso em: 20 maio 2022.

CHICORONI, E. P. **Efeito da reumidificação e secagem em leito esteira na qualidade da semente de *Brachiaria brizantha***. 1999. 83p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1999.

CHIRIFE, J. **Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods**. In: MUJUMDAR, A. S. *Advances in drying*. Washington Hemisphere Publishing Corporation, v.1, p.73-102, 1983. In: MARTINS, P. C. *Secagem de Cebola (Allium cepa L.) em Camada Delgada: Estudo da*

Cinética e das Características do Produto Desidratado. Tese (Mestrado) Departamento de Química, Fundação Universidade de Rio Grande, 2002.

Cornichão URS BRS Posteiro. Soluções tecnológicas. **Embrapa**. 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/6942/cornichao-urs-brs-posteiro>. Acesso em: 16 maio 2022.

DO COUTO GARCIA, L.; LEITES, L. P.; PEREIRA DE MENEZES, F. análise de germinação de sementes de *Lotus corniculatus* L. quando submetidas a diferentes tratamentos. In: CONGREGA URCAMP: EDUCAÇÃO E DESENVOLVIMENTO REGIONAL. 15., 2018, Bagé. **Anais eletrônicos** : [<http://revista.urcamp.edu.br/index.php/congregaanaismic/issue/view/91>]. Bagé: URCAMP, 2018. p. 7-8. Disponível em: [revista.urcamp.tche.br/index.php/congregaanaismic/article/view/3323&sa=D&source=docs&ust=1653090549323022&usg=AOvVaw1Adp7aFUisMGAQVcoIzIkE](http://revista.urcamp.tche.br/index.php/congregaanaismic/article/view/3323&sa=D&source=docs&ust=1653090549323022&usg=AOvVaw1Adp7aFUisMGAQVcoIzIkE). Acesso em: 16 maio 2022.

DOYMAZ, I. Thin-layer drying behavior of mint leaves. **Journal of Food Engineering**, v. 74, n. 3, p. 370-375, 2006. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877405001676?casa\\_token=kriOQqsRyjoAAAAA:SuXtBhutupN51UDkPwE4PkSAODgCu7q25uHI4KiCge5wQL\\_8tVdqpmGkdFy8mUpscznQbgZclv417](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877405001676?casa_token=kriOQqsRyjoAAAAA:SuXtBhutupN51UDkPwE4PkSAODgCu7q25uHI4KiCge5wQL_8tVdqpmGkdFy8mUpscznQbgZclv417). Acesso em: 16 maio 2022.

GONELI, A. L. D. et al. Modelagem matemática e difusividade efetiva das folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária e Tropical**, v. 44, n. 1, p. 56-64, jan./mar., 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pat/a/wznQGGYH7PJhKYRYJZ5W7ZJ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 16 maio 2022.

FERREIRA, Margarete Martins Pereira. **Desenvolvimento, Caracterização e secagem de sementes com cobertura artificial**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, São

Carlos, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4065/DoutMMPF.pdf?sequence=1>. Acesso em: 16 maio 2022.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro, LTC, 2008.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípio das operações unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

GASPARIN, P. P.; CHRIST, D.; COELHO, S. R. M. Secagem de folhas *Mentha piperita* em leito fixo utilizando diferentes temperaturas e velocidades de ar. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 48, n. 2, p. 242-250, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/wfdjctrd7BSL6MmL4wNzTFQ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 17 maio 2022.

KANAAN, A. F.; OLIVEIRA, L. C. de; FLORES, C. G.; OLIVEIRA, J.C.P.; ALMEIDA, A. R. F. de. Estudo da secagem de cornichão em leito fixo com escoamento de ar paralelo. **Revista de Ciência Exatas. Seropédica**, v.34, n.1, p. 076-091, 2015. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1078718/1/3102144101PB.pdf.h>. Acesso em: 17 maio 2022.

KANAAN, Akel Ferreira. Análise da secagem de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em leito fixo com escoamento de ar paralelo. 2014. Tese (Mestrado em *Stricto sensu* Engenharia) - Universidade Federal do Pampa. Programa de Pós-graduação em *Stricto sensu* em Engenharia, Bagé, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/bitstream/riui/1238/1/An%c3%a1lise%20da%20Secagem%20de%20Cornich%c3%a3o-Akel%20FKanaan.pdf>. Acesso em: 17 maio 2022.

MACEDO, G. A. R.; MARQUES NETO, J. E.; BAPTISTA, J. S. Secagem à sombra e ao sol de sementes de gramíneas forrageiras. **Revista**

**Brasileira de Sementes**, v. 9, n. 3, p. 29-37, 1987.

MELLADO, Emanuel Carlos Enrique Rozas. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de pinus**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Curitiba, 2007. Disponível em: [http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf\\_dr/2007/t226\\_0252-D.pdf](http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf_dr/2007/t226_0252-D.pdf). Acesso em: 16 maio 2022.

SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, W. P.; FARIAS, V. S. O.; GOMES, J. P. Effective diffusivity and convective mass transfer coefficient during the drying of bananas. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n°2, p.342-353, mar./abr., 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/skLRCQc7FwcP9D8vBFyKHWk/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 16 maio 2022.