

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Propriedades físicas, higroscópicas e aerodinâmicas de caroços de algodão
com línter e deslintados**

Diana Soares Magalhães
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

DIANA SOARES MAGALHÃES

**Propriedades físicas, higroscópicas e aerodinâmicas de caroços de algodão
com línter e deslintados**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Paulo Cesar Correa

Coorientadores: Juliana Soares Zeymer
Luis Cesar da Silva

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

M188p
2026

Magalhães, Diana Soares, 1996-

Propriedades físicas, higroscópicas e aerodinâmicas de
caroços de algodão com línter e deslintados / Diana Soares
Magalhães. – Viçosa, MG, 2026.

1 tese eletrônica (167 f.): il. (algumas color.).

.

Inclui apêndices.

Orientador: Paulo César Corrêa.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2026.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.379>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Algodão - Semente - Fisiologia pós-colheita. 2. Plantas -
Relações hídricas. I. Corrêa, Paulo César, 1951-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
III. Título.

CDD 22. ed. 633.5121

DIANA SOARES MAGALHÃES

**Propriedades físicas, higroscópicas e aerodinâmicas de caroços de algodão
com línter e deslintados**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 16 de março de 2026.

Assentimento:

Diana Soares Magalhães
Autora

Paulo Cesar Correa
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pela autora em 29/06/2026 às 17:24:56 e pelo orientador em 13/07/2026 às 14:51:51. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **Y813.9RED.USSW** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me guiar, conceder força, saúde e resiliência para enfrentar os desafios e concluir esta etapa tão importante da minha jornada.

Agradeço à minha família, que sempre me apoiou e acreditou em mim e que, mesmo à distância, nunca deixou de se fazer presente. Um agradecimento cheio de saudade à minha avó, Maria do Socorro (in memoriam), cuja presença permaneceu além da despedida e segue comigo, cuidando de mim onde quer que esteja.

Ao Danley, por todo o apoio, carinho e incentivo. Agradeço por cada palavra de afeto e por me impulsionar nos momentos em que o cansaço me fez pensar em desistir. Obrigada por acolher minhas fragilidades e me mostrar que ser vulnerável ao seu lado também é uma forma de encontrar força.

Aos meus amigos, pelas trocas, parceria e apoio ao longo da vida. Em especial a Emanuely, Érica e Ludmila, para quem o tempo e a distância tornam-se meros detalhes sempre que nos reencontramos.

Às colegas do apartamento 202, obrigada pela amizade, acolhimento e por tornarem essa caminhada mais leve e cheia de boas memórias.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Cesar Corrêa, pela orientação e contribuições fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos coorientadores, Prof. Dr. Luís César Silva e Dra. Juliana Soares Zeymer, pela confiança, apoio e importantes contribuições científicas que enriqueceram esta tese.

Aos membros da banca avaliadora, pelo tempo dedicado à leitura e pelas valiosas contribuições para o aprimoramento final do trabalho.

À Profa. Dra. Luana Haeberlin, pelos ensinamentos, pela disponibilidade em colaborar e pelas valiosas contribuições que agregaram conhecimento e qualidade a este trabalho. Agradeço também pela ajuda constante, discussões enriquecedoras, conversas sempre oportunas e pelos cafés compartilhados que, embora eu ainda não tenha aprendido a apreciar, tornaram os momentos ainda mais especiais.

Aos colegas do Laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação da Qualidade, Fernanda Dias, Rafael Alves, Mário Filho e Kamaldeen Yusuf, pela amizade construída ao longo desta jornada, pelas discussões científicas produtivas e pelas colaborações constantes no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas e funcionários do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem e Assuntos Afins (CENTREINAR), especialmente Fernanda, Gefferson e Rita, pela colaboração, prontidão em ajudar, conversas,

momentos de descontração e pela amizade construída ao longo dessa trajetória.

Aos colegas do departamento, da universidade e a todos que estiveram presentes neste percurso, contribuindo para esta conquista.

À SLC Agrícola, pelo financiamento e apoio, fundamentais para a execução do trabalho e fortalecimento da parceria entre universidade e setor produtivo.

À Projelmec Ventilação Industrial, pelo apoio ao longo desta trajetória e doação do equipamento utilizado na pesquisa.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso e pelo ambiente acadêmico propício ao desenvolvimento científico e profissional.

Aos professores, técnicos e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, pela dedicação, apoio e contribuição para minha formação acadêmica, bem como pela colaboração ao longo desta trajetória.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho, minha sincera gratidão. Esta conquista é fruto de uma construção coletiva. Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

MAGALHÃES, Diana Soares, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2026. **Propriedades físicas, higroscópicas e aerodinâmicas de caroços de algodão com línter e deslintados.** Orientador: Paulo Cesar Correa. Coorientadores: Juliana Soares Zeymer e Luis Cesar da Silva.

Conhecer as propriedades físicas, higroscópicas e aerodinâmicas de produtos agrícolas é essencial para o adequado dimensionamento de equipamentos e operações de pós-colheita como secagem, aeração e transporte. Neste contexto, o presente conjunto de estudos avaliou a influência do teor de água nas características físicas, no comportamento higroscópico e na resistência ao fluxo de ar de caroços de algodão (*Gossypium hirsutum* L.), cultivar IMA 5801 B2RF, com línter e deslintado. Para a caracterização física, observou-se que a elevação do teor de água promoveu a expansão dimensional e o escurecimento do tegumento em ambos os produtos. A presença do línter influenciou significativamente o comportamento gravimétrico, enquanto a massa específica aparente dos caroços deslintados diminuiu com o aumento do teor de água, nos caroços com línter observou-se tendência oposta. A velocidade terminal aumentou linearmente com o teor de água para ambas as condições, sendo que os caroços deslintados demandaram maiores fluxos de ar para atingir a suspensão, operando sob maiores números de Reynolds. A presença do línter elevou significativamente o coeficiente de arrasto, evidenciando sua influência nas propriedades aerodinâmicas. Quanto ao equilíbrio higroscópico, as isotermas de sorção foram classificadas como Tipo III e o melhor ajuste dos dados experimentais foi obtido pelo modelo matemático Sigma-Copace. A presença do línter intensificou o fenômeno de histerese, atuando como barreira física à sorção. A análise termodinâmica revelou que o calor isostérico integral e a entropia diferencial diminuem com o aumento do teor de água, evidenciando a alta energia de ligação em baixos teores de água. A validação da teoria da compensação isocinética confirmou que o processo é controlado pela entalpia, em ambos os produtos. Por fim, a análise da resistência ao fluxo de ar em camada fixa demonstrou que a pressão estática varia linearmente com a altura do leito e de forma não linear com o fluxo de ar. Caroços com línter apresentaram maiores gradientes de pressão, refletindo maior resistência ao escoamento devido à rugosidade superficial e menor tamanho de poros, sendo este comportamento ajustado satisfatoriamente pelo modelo de Shedd. De forma geral, os resultados evidenciam que tanto o teor de água quanto a presença do línter exercem influência significativa sobre as propriedades físicas, higroscópicas e aerodinâmicas dos caroços de

algodão e que conhecer as especificidades de cada produto fornece subsídios técnicos essenciais para o dimensionamento e a otimização de equipamentos e sistemas de pós-colheita.

Palavras-chave: teor de água; modelos matemáticos; histerese; armazenamento; perda de carga

ABSTRACT

MAGALHÃES, Diana Soares, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2026. **Physical, hygroscopic and aerodynamic properties of fuzzy and delinted cottonseeds.** Adviser: Paulo Cesar Correa. Co-advisers: Juliana Soares Zeymer and Luis Cesar da Silva.

Understanding the physical, hygroscopic, and aerodynamic properties of agricultural products is essential for the proper sizing of post-harvest equipment and operations such as drying, aeration, and transportation. In this context, this set of studies evaluated the influence of water content on the physical characteristics, hygroscopic behavior, and airflow resistance of cottonseed (*Gossypium hirsutum* L.), cultivar IMA 5801 B2RF, with and without lint. For the physical characterization, we observed that increasing the water content promoted dimensional expansion and darkening of the seed coat in both products. The presence of lint significantly influenced the gravimetric behavior, while the apparent specific mass of the delinted seeds was affected by the increase in water content; in the seeds with lint, the opposite trend was observed. Terminal velocity increased linearly with water content for both conditions, with delinted lumps requiring higher airflows to reach suspension, operating under higher Reynolds numbers. The presence of lint was significantly the drag coefficient, highlighting its influence on aerodynamic properties. Regarding hygroscopic equilibrium, the classification isotherms were defined as Type III, and the best fit of the experimental data was obtained by the Sigma-Copace mathematical model. The presence of lint intensified the appearance of hysteresis, acting as a physical barrier to sorption. A thermodynamic analysis revealed that the integral isosteric heat and differential entropy decrease with increasing water content, highlighting the high binding energy at low water contents. Validation of the isokinetic compensation theory confirmed that the process is enthalpy-controlled in both products. Finally, an analysis of airflow resistance in a fixed layer demonstrated that static pressure varies linearly with bed height and non-linearly with airflow. Cottonseeds with linters exhibited higher pressure gradients, reflecting greater resistance to flow due to surface roughness and smaller pore size, a behavior satisfactorily fitted by the Shedd model. Overall, the results show that both the water theory and the presence of linters exert a significant influence on the physical, hygroscopic, and aerodynamic properties of cottonseeds, and that understanding the specific characteristics of each product provides essential technical support for the design and optimization of post-harvest equipment and systems.

Keywords: moisture content; mathematical models; hysteresis; storage; pressure drop

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1 – INFLUÊNCIA DO TEOR DE ÁGUA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CAROÇOS DE ALGODÃO

Figura 1. Caroços de algodão com línter (esquerda) e deslinterado (direita).....	30
Figura 2. Dimensões características de (a) comprimento, (b) largura e (c) espessura para caroços de algodão com línter e deslinterados.	32
Figura 3. Influência do teor de água nas dimensões características de comprimento (a), largura (b), espessura (c) e diâmetro geométrico (D_g) para os caroços de algodão com línter (A) e deslinterados (B).....	37
Figura 4. Médias de volume (V), área projetada (A_p), área superficial (A_s) e perímetro (P) para os caroços de algodão com línter (A) e deslinterados (B), em função do teor de água.....	39
Figura 5. Circularidade (C) e esfericidade (E) para caroços de algodão com línter (A) e deslinterados (B).....	39
Figura 6. Massa específica unitária (ρ_u) e a massa específica aparente (ρ_{ap}) em função do teor de água para os caroços de algodão com línter (A) e deslinterados (B).....	41
Figura 7. Análise de regressão da influência do teor de água na porosidade de caroços de algodão com línter (A) e deslinterados (B).....	43
Figura 8. Peso de mil grãos em função do teor de água em caroços de algodão com línter (A) e deslinterados (B).....	44
Figura 9. Regressão linear para as dimensões colorimétricas do espaço $L^*a^*b^*$ para caroços de algodão com línter (A) e deslinterados (B).....	45
Figura 10. Regressão linear para as propriedades de saturação (S) e ângulo hue (h°) para caroços de algodão com línter (A) e deslinterados (B).....	47
Figura 11. Velocidade terminal (V_t) para caroços de algodão com línter (A) e deslinterados (B) em função do teor de água.....	49
Figura 12. Coeficiente de arrasto (C_d) e força de arrasto (F_d) para caroços de algodão com línter (A) e deslinterados (B).....	50
Figura 13. Número de Reynolds (Re) para caroços de algodão com línter (A) e deslinterados (B).....	51

CAPÍTULO 2 - MODELAGEM MATEMÁTICA DAS ISOTERMAS DE SORÇÃO E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS PARA CAROÇOS DE ALGODÃO

Figura 1. Limites de atividade de água para o desenvolvimento microbiano e exemplos de produtos correspondentes a cada faixa.	68
Figura 2. Cinco tipos de isotermas de sorção.	70
Figura 3. Sistema composto por dessecador, solução salina, amostras de caroços de algodão e termo-higrômetro para determinação de equilíbrio higroscópico.	78
Figura 4. Isotermas de adsorção (A) e dessorção (B) observadas e estimadas pelo modelo de Sigma Copace para caroços de algodão com línter nas temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C.	94
Figura 5. Isotermas de adsorção (A) e dessorção (B) observadas e estimadas pelo modelo de Sigma Copace para caroços de algodão deslintados nas temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C.	95
Figura 6. Representação gráfica do fenômeno de histerese entre as curvas de adsorção e dessorção preditas pelo modelo Sigma Copace para caroços de algodão com línter a temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C.	101
Figura 7. Representação gráfica do fenômeno de histerese entre as curvas de adsorção e dessorção preditas pelo modelo Sigma Copace para caroços de algodão deslintados a temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C.	103
Figura 8. Curvas do logaritmo neperiano da atividade de água (adimensional) em função de $1/T$ (K^{-1}) para os teores de água de equilíbrio da adsorção (A) e dessorção (B) dos caroços de algodão com línter.	107
Figura 9. Curvas do logaritmo neperiano da atividade de água (adimensional) em função de $1/T$ (K^{-1}) para os teores de água de equilíbrio da adsorção (A) e dessorção (B) dos caroços de algodão deslintados.	108
Figura 10. Variações do calor isostérico integral de sorção para os caroços de algodão com línter (A) e deslintados (B).	108
Figura 11. Variações da entropia diferencial em função do teor de água de equilíbrio para os caroços de algodão com línter (A) e deslintados (B).	111
Figura 12. Relação entalpia-entropia em função do teor de água para caroços de algodão com línter (A) e deslintados (B).	113
Figura 13. Distribuição dos resíduos dos modelos matemáticos para obtenção do teor de água de equilíbrio de caroços de algodão com línter no processo de adsorção.	130
Figura 14. Distribuição dos resíduos dos modelos matemáticos para obtenção do teor de água de equilíbrio de caroços de algodão com línter no processo de dessorção.	132

Figura 15. Distribuição dos resíduos dos modelos matemáticos para obtenção do teor de água de equilíbrio de caroços de algodão deslintados no processo de adsorção. 135

Figura 16. Distribuição dos resíduos dos modelos matemáticos para obtenção do teor de água de equilíbrio de caroços de algodão deslintados no processo de dessorção. 137

CAPÍTULO 3 - MODELAGEM DA RESISTÊNCIA AO FLUXO DE AR EM CAROÇOS DE ALGODÃO

Figura 1. Protótipo para determinação da resistência ao fluxo de ar em coluna de caroços de algodão com línter e deslintados. 147

Figura 2. Pressão estática (Pa) em função da altura (m) da coluna de caroços de algodão com línter. 151

Figura 3. Pressão estática em função da altura da coluna de caroços de algodão deslintado. 152

Figura 4. Ajuste da equação de Shedd aos dados experimentais de gradiente de pressão em função do fluxo de ar. 157

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 - MODELAGEM MATEMÁTICA DAS ISOTERMAS DE SORÇÃO E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS PARA CAROÇOS DE ALGODÃO

Tabela 1. Composição das soluções salinas saturadas.	76
Tabela 2. Valores de umidade relativa de equilíbrio (decimal) associados às soluções salinas saturadas nas temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C.....	76
Tabela 3. Modelos matemáticos usados para a predição do equilíbrio higroscópico em caroços de algodão com línter e deslintados.....	78
Tabela 4. Estimativa dos parâmetros para os modelos de equilíbrio higroscópico no processo de adsorção de caroços de algodão com línter.	85
Tabela 5. Estimativa dos parâmetros para os modelos de equilíbrio higroscópico no processo de dessorção de caroços de algodão com línter.....	88
Tabela 6. Estimativa dos parâmetros para os modelos de equilíbrio higroscópico no processo de adsorção de caroços de algodão deslintado.	90
Tabela 7. Estimativa dos parâmetros para os modelos de equilíbrio higroscópico no processo de dessorção de caroços de algodão deslintado.....	92
Tabela 8. Teores de água de equilíbrio (% b.u.) para caroços de algodão com línter estimados pelo modelo Sigma Copace, para o processo de adsorção em diferentes condições de temperatura (°C) e umidade relativa (% UR).	96
Tabela 9. Teores de água de equilíbrio (% b.u.) para caroços de algodão com línter estimados pelo modelo Sigma Copace, para o processo de dessorção em diferentes condições de temperatura (°C) e umidade relativa (% UR).	97
Tabela 10. Teores de água de equilíbrio (b.u.) para caroços de algodão deslintado estimados pelo modelo Sigma Copace, para o processo de adsorção em diferentes condições de temperatura (°C) e umidade relativa (% UR).	98
Tabela 11. Teores de água de equilíbrio (% b.u.) para caroços de algodão deslintado estimados pelo modelo Sigma Copace, para o processo de dessorção em diferentes condições de temperatura (°C) e umidade relativa (% UR).	99
Tabela 12. Atividade de água (adimensional) no processo de adsorção, estimados pelo modelo de Sigma Copace para caroços de algodão com línter, em função da temperatura (°C) e do teor de água de equilíbrio (b.s.).	104

Tabela 13. Atividade de água (adimensional) no processo de dessorção, estimados pelo modelo de Sigma Copace para caroços de algodão com línter, em função da temperatura (°C) e do teor de água de equilíbrio (b.s.).	105
Tabela 14. Atividade de água (adimensional) no processo de adsorção, estimados pelo modelo de Sigma Copace para caroços de algodão deslintados, em função da temperatura (°C) e do teor de água de equilíbrio (b.s.).	106
Tabela 15. Atividade de água na dessorção de caroços de algodão deslintados, estimada pelo modelo Sigma-Copace, em função da temperatura e do teor de água de equilíbrio.	106
Tabela 16. Equações ajustadas aos dados experimentais do calor isostérico integral (Q_{st}), em caroços de algodão com línter e deslintado.	110
Tabela 17. Equações ajustadas aos dados experimentais da entropia diferencial (ΔS), em caroços de algodão com línter e deslintado.	112
Tabela 18. Temperatura isocinética (T_B), a temperatura média harmônica (T_{hm}), a energia livre de Gibbs isocinética (G_B) obtidos pela relação entalpia-entropia para caroços de algodão com línter e deslintados.	113

CAPÍTULO 3 - MODELAGEM DA RESISTÊNCIA AO FLUXO DE AR EM CAROÇOS DE ALGODÃO

Tabela 1. Modelos matemáticos para a estimativa da perda de pressão estática de caroços de algodão.	148
Tabela 2. Propriedades físicas dos caroços de algodão usadas nos modelos de resistência ao fluxo de ar.	149
Tabela 3. Estimativa dos parâmetros para os modelos da resistência ao fluxo de ar ($m^3.s^{-1}.m^{-2}$) para caroços de algodão com línter.	155
Tabela 4. Estimativa dos parâmetros para os modelos da resistência ao fluxo de ar ($m^3.s^{-1}.m^{-2}$) para caroços de algodão deslintado.	156

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIC	Critério de Informação de Akaike
ASAE	Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas
ASABE	Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas e Biólogos
a_w	Atividade de água
BIC	Critério de Informação Bayesiano
b.s.	Base seca
CIE	Comissão Internacional de Iluminação
CENTREINAR	Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem e Assuntos Afins
F_d	Força de arrasto
h°	Ângulo hue ou Tom
Hz	Hertz
$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$	Quilogramas de água por quilogramas de matéria seca
MG	Minas Gerais
MRE	Erro médio relativo
PMG	Peso de mil grãos
P_v	Pressão de vapor
P_{vs}	Pressão de vapor de saturação
R^2	Coefficiente de determinação
RAS	Regras para Análise de Sementes
Re	Número de Reynolds
SDE	Erro padrão da estimativa
U^*	Teor de água em base seca
U_e	Teor de água de equilíbrio
UR	Umidade Relativa
V_t	Velocidade terminal
v/v	Volume por volume (concentração)
UFV	Universidade Federal de Viçosa

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
Δ	Delta
∂	Derivada parcial
&	E comercial
Σ	Somatório
ε	Porosidade
ρ	Massa específica
®	Marca registrada
μ	Viscosidade

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	19
CAPÍTULO 1 - INFLUÊNCIA DO TEOR DE ÁGUA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CAROÇOS DE ALGODÃO	20
RESUMO	20
1 INTRODUÇÃO.....	21
2 REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1 Carços de algodão	23
2.2 Propriedades Físicas de Produtos Agrícolas	25
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1 Preparo das amostras.....	30
3.2 Propriedades Geométricas.....	31
3.3 Propriedades Gravimétricas	32
3.4 Propriedades ópticas.....	35
3.5 Propriedades aerodinâmicas.....	35
3.6 Análise Estatística	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 Propriedades Geométricas.....	37
4.2 Propriedades Gravimétricas	40
4.3 Propriedades ópticas.....	45
5 CONCLUSÕES	53
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
CAPÍTULO 2 - MODELAGEM MATEMÁTICA DAS ISOTERMAS DE SORÇÃO E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS PARA CAROÇOS DE ALGODÃO.....	63
RESUMO	63
1 INTRODUÇÃO.....	64
2 REVISÃO DE LITERATURA	66

2.1 Higroscopicidade dos produtos agrícolas.....	66
2.2 Propriedades termodinâmicas	73
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	75
3.1 Preparo das amostras.....	75
3.2 Preparo das soluções salinas saturadas	76
3.3 Teor de água de equilíbrio.....	76
3.4 Análise estatística.....	79
3.5 Análise do fenômeno de histerese.....	80
3.6 Propriedades termodinâmicas	81
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4.1 Modelagem matemática das isotermas de sorção	85
4.2 Histerese.....	100
4.3 Propriedades termodinâmicas	104
5 CONCLUSÕES	115
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
APÊNDICE A	128
APÊNDICE B.....	133
CAPÍTULO 3 - MODELAGEM DA RESISTÊNCIA AO FLUXO DE AEREM CAROÇOS DE ALGODÃO.....	138
RESUMO	138
1 INTRODUÇÃO.....	139
2 REVISÃO DE LITERATURA	141
2.1 Resistência ao fluxo de ar	141
2.2 Fatores que influenciam a resistência ao fluxo de ar	142
2.3 Modelos matemáticos	144
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	146
3.1 Procedimento experimental.....	146

3.2 Modelagem matemática	148
3.3 Análise estatística.....	149
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	151
5 CONCLUSÕES	159
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160
CONCLUSÃO GERAL	166

INTRODUÇÃO GERAL

O algodão (*Gossypium hirsutum* L.) é uma cultura de importância global, destacando-se não apenas pelo fornecimento de fibra para a indústria têxtil, mas também pelo alto valor comercial e nutricional de seu principal subproduto: o caroço de algodão. Rico em óleo e proteínas, o caroço de algodão é amplamente utilizado na formulação de ração animal e extração de óleo. Após o descaroçamento, esses podem reter fibras residuais na superfície, conhecidas como linter ou passar por um processo químico de deslinteramento para remoção dessas fibras, o que facilita operações mecânicas de plantio e evita a deterioração.

O dimensionamento e a otimização de máquinas e processos de pós-colheita, como secagem, aeração, transporte e armazenamento, exigem um conhecimento profundo das propriedades do material. Nesse contexto, o presente trabalho avalia como o teor de água e a presença ou ausência de linter influenciam as características físicas, higroscópicas e aerodinâmicas dos caroços de algodão (cultivar IMA 5801 B2RF), sendo estruturada em três capítulos complementares.

Capítulo 1: Aborda a caracterização física dos caroços, avaliando as mudanças em suas propriedades geométricas, gravimétricas, ópticas (cor) e aerodinâmicas em diferentes níveis de teor de água.

Capítulo 2: Foca no comportamento higroscópico do produto, realizando a modelagem matemática das isotermas de sorção (adsorção e dessorção) e determinando suas propriedades termodinâmicas, que são fundamentais para definir limites seguros de armazenamento.

Capítulo 3: Investiga a resistência ao fluxo de ar em camadas fixas de caroços de algodão, comparando o gradiente de pressão gerado pelos produtos com linter e deslinterado, e aplicando modelos matemáticos para prever a perda de carga, essencial ao projeto de sistemas de aeração e secagem.

CAPÍTULO 1

INFLUÊNCIA DO TEOR DE ÁGUA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CAROÇOS DE ALGODÃO

RESUMO

O conhecimento das propriedades físicas de produtos agrícolas é fundamental para os sistemas de pós-colheita. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do teor de água nas características físicas de caroços de algodão com línter e deslintados. As amostras foram condicionadas a diferentes teores de água e submetidas à análise de propriedades geométricas, gravimétricas, colorimétricas e aerodinâmicas. Os resultados indicaram que o aumento do teor de água promoveu expansão dimensional e escurecimento do tegumento em ambos os tipos de produto. A presença do línter alterou significativamente as relações de massa e volume do produto. Enquanto a massa específica aparente dos caroços deslintados diminuiu com o aumento do teor de água, os caroços com línter apresentaram o comportamento oposto, o que propiciou, conseqüentemente, uma menor porosidade do leito. A velocidade terminal apresentou crescimento linear com o aumento do teor de água para ambos os produtos. Os caroços deslintados exigiram maiores fluxos de ar para alcançar a condição de suspensão, operando em regimes de maior número de Reynolds, enquanto a presença do línter promoveu elevação expressiva do coeficiente de arrasto. Conclui-se que tanto o línter quanto o teor de água exercem influência significativa sobre as propriedades físicas dos caroços de algodão. O conhecimento dessas características fornece subsídios técnicos essenciais para o adequado dimensionamento de equipamentos de secagem e aeração, armazenagem, sistemas de transporte e demais operações de pós-colheita.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum*, armazenamento, beneficiamento, línter.

1 INTRODUÇÃO

O algodão (*Gossypium hirsutum* L.) destaca-se como a principal cultura destinada à produção de fibra natural no mundo. Além de sua relevância para a indústria têxtil, a cultura tem recebido crescente atenção devido ao aproveitamento para além da fibra, especialmente na extração de óleo e na produção de farelos e tortas com elevado teor proteico, amplamente utilizados na alimentação animal (Kebede; Balcha, 2024).

No processamento do algodão, diferentes maquinários agrícolas e industriais são empregados, cada um operando segundo parâmetros físicos específicos. Dessa forma, é fundamental determinar e analisar as propriedades físicas dos caroços de algodão, com a finalidade de obter informações essenciais para o dimensionamento de equipamentos destinados ao seu processamento e estratégias de armazenagem. Isso permite a padronização das características para a comercialização, o que por sua vez, potencializa a valorização desse produto (Özarslan, 2002).

Durante o beneficiamento do algodão, são obtidos dois produtos valiosos: a fibra, destinada principalmente às indústrias têxteis e as sementes/grãos, comumente chamadas de caroços. Após o descaroçamento, algumas fibras permanecem aderidas ao tegumento dos caroços de algodão, resultando em uma aparência felpuda. Essas fibras residuais são conhecidas como linter. Quando destinados ao plantio, os caroços de algodão passam pelo processo de deslinteramento, que remove as fibras da superfície, facilitando a classificação, limpeza e o plantio mecanizado (Afzal et al., 2020; Kamran; Afzal, 2020). O caroço de algodão é o principal subproduto do algodão, destacando-se pelo elevado teor de proteína (20 a 25%) e óleo (15 a 18%). Esse dispõe de grande valor para a alimentação humana e animal, devido ao equilíbrio entre ácidos graxos saturados e insaturados e elevado teor de ácido linoleico, propriedades de alta importância para a indústria alimentícia (Kumar et al., 2023; Riaz et al., 2021; Zia et al., 2021).

Conforme destacado por Mohsenin (1986), conhecer as propriedades físicas de produtos agrícolas é indispensável para estabelecer métodos e procedimentos relativos à engenharia de processamento. A caracterização física de produtos agrícolas envolve a avaliação integrada de propriedades geométricas, gravimétricas, ópticas e aerodinâmicas, fundamentais para as etapas de beneficiamento, processamento, armazenagem e comercialização. As propriedades geométricas referem-se ao comprimento, largura e espessura do produto e a partir dessas são calculados parâmetros como circularidade, esfericidade, volume, perímetro e área projetada. Essas variáveis são essenciais para a descrição de processos relacionados à cinética de secagem,

definição de parâmetros de qualidade e o dimensionamento de secadores, sistemas de aeração, transportadores, máquinas de limpeza e equipamentos de classificação de produtos agrícolas (Goneli et al., 2011; Ribeiro et al., 2002; Brooker et al., 1992).

As propriedades gravimétricas como massa específica aparente, massa específica unitária, porosidade e peso de mil grãos desempenham papel fundamental em diversas etapas do processamento. A massa específica é utilizada no cálculo da capacidade estática para instalações de armazenagem, na compreensão da difusividade térmica, separação de impurezas e análise da composição química e estrutura física do material. A porosidade influencia diretamente processos de transferência de calor e massa, afeta a resistência ao fluxo do ar e nos processos de secagem e aeração (Gojiya et al., 2020). O peso de mil grãos é um importante indicador da maturação fisiológica das sementes e reflete o acúmulo de matéria seca nos tecidos de reserva (Anjali et al., 2023).

No que se refere às propriedades ópticas, a cor é um parâmetro importante não apenas por sua relação com alterações físico-químicas e com o estado de conservação do produto, mas pelos estímulos visuais que influenciam os consumidores a comprarem ou consumirem produtos (Kumar et al., 2022; Joardder et al., 2016; Mohsenin, 1986).

Por fim, as propriedades aerodinâmicas, como velocidade terminal e coeficiente de arrasto, são determinantes para o projeto e operação de equipamentos de separação e transporte pneumáticos e sistemas de limpeza. Sua avaliação permite prever o comportamento do produto em correntes de ar, contribuindo para a otimização dos processos de beneficiamento (Hashemifesharaki, 2020).

Portanto, essa pesquisa teve como objetivo caracterizar as propriedades físicas do caroço de algodão com línter e deslinterado em diferentes teores de água, fornecendo subsídios técnicos para aprimorar o processamento, beneficiamento e armazenagem. A hipótese central deste estudo é que o línter exerce influência significativa sobre a forma e o tamanho dos caroços, e que essa estrutura altera a resposta das propriedades físicas às variações no teor de água. A compreensão de como a interação entre a presença de línter e o teor de água afeta o produto é fundamental para a otimização de processos como secagem, avaliação de qualidade e o adequado dimensionamento de equipamentos empregados nas etapas de pós-colheita e beneficiamento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Carços de algodão

A cultura do algodão (*Gossypium hirsutum* L.) é uma das principais fontes de fibra natural desde os primórdios da civilização, em especial para a fabricação de roupas, devido às suas características absorventes, permeáveis, macias e duráveis. Além das fibras para indústria têxtil, o algodão é uma rica fonte de óleo comestível e industrial, sendo a quinta maior oleaginosa, além de ser considerado uma das melhores fontes de proteína para alimentação animal (Zia et al., 2022; Afzal et al., 2020).

Após o descaroçamento, o caroço de algodão é composto por línter, casca e embrião. A remoção das fibras possibilita a obtenção do algodão químico, enquanto a casca apresenta potencial de aproveitamento em diferentes aplicações, sendo utilizada, por exemplo, na formulação de ração animal e como substrato para o cultivo de cogumelos. Além disso, sob a perspectiva química, esse material tem sido empregado como matéria-prima para a produção de derivados de celulose, tais como acetato de celulose, ésteres mistos de celulose, carboximetilcelulose, carboximetilxilana e nanocelulose, evidenciando seu valor agregado e versatilidade industrial (Cheng et al., 2020).

Em geral, os caroços de algodão contêm cerca de 16% de óleo, além de serem ricos em proteína de alta qualidade. O caroço de algodão é prensado para a extração de óleo, que tem significativo valor comercial. Tanto o caroço de algodão inteiro quanto a farinha podem ser fornecidos como fonte energética e de proteína suplementar na dieta de animais como vacas e bezerros e incluída na ração de alguns animais domésticos e peixes (Mullenix et al., 2022; Cheng et al., 2020).

O línter dos caroços de algodão é utilizado para aplicações como almofadas para móveis, papel-moeda e materiais absorventes, além do uso em equipamentos hospitalares e materiais cirúrgicos. Após tratamento químico, tanto o óleo quanto o línter podem servir como agentes de volume em sorvetes e pastas de dente, além de serem utilizados em filmes fotográficos e de raio X, brinquedos, tubos flexíveis, polimentos, membranas, plásticos, couros sintéticos, vernizes, dentre outros (Sihag et al., 2021, Munir et al., 2020; Cheng et al., 2020). Recentemente, o óleo extraído do caroço de algodão tem se destacado na produção de biocombustível devido ao seu perfil de carbono negativo, que contribui significativamente para a redução de emissões de CO₂ em comparação ao uso de combustíveis fósseis (Wu et al., 2022).

Os processos de produção e a colheita do algodão, quando conduzidos adequadamente, garantem caroços de algodão/sementes de alta qualidade. No entanto, esse potencial pode ser reduzido ao longo das etapas de processamento e manuseio, em função das condições pós-colheita e práticas adotadas. Após a colheita, o algodão passa pelos processos de descaroçamento, secagem e deslinteramento. No descaroçamento, a fibra é separada do caroço por maquinário específico (descaroçador), que deve realizar a operação de maneira eficiente e sem causar danos às fibras ou ao tegumento. A qualidade dos caroços de algodão pode ser comprometida por danos mecânicos no tegumento, cuja extensão do dano depende do teor de água do produto durante o descaroçamento. Teores de água abaixo de 12% (b.s.) são indicados para a manutenção da qualidade da fibra e para proteger o produto de danos mecânicos. Teores acima desse nível aumentam proporcionalmente a taxa de danos (Afzal et al., 2020; Negm; Sanad, 2020).

Após o descaroçamento, os caroços de algodão contêm fibras curtas envoltas no tegumento, conhecidas como línter. A remoção dessas fibras é necessária para um plantio eficiente. Caso o línter não seja removido, podem ocorrer dois problemas: (i) dificuldade no plantio mecânico, já que os caroços de algodão ficarão aglomerados no equipamento reduzindo a homogeneidade do plantio e (ii) restauração do teor de água das sementes em decorrência do contato com o solo, criando condições favoráveis ao desenvolvimento fúngico e deterioração do produto (Afzal et al., 2020).

O línter pode ser removido por métodos químicos ou mecânicos. A remoção química é realizada por meio da imersão dos caroços de algodão com línter em ácido sulfúrico (H_2SO_4). Esse processo deve ser realizado com cautela e precisão, já que baixas doses do ácido podem não remover o línter por completo, enquanto doses excessivas podem danificar o tegumento. No processo mecânico, o línter é removido por meio da abrasão física. Esse método exige esforço e maior tempo de operação, mas preserva o produto de danos químicos (Bridges et al., 2024; Afzal et al., 2020; Holt et al., 2017). O deslinteramento ácido pode auxiliar na remoção de sementes de ervas daninhas colhidas juntamente com o algodão (Kebede; Balcha, 2024).

Armazenar adequadamente o produto agrícola é fundamental para preservar sua qualidade por um período prolongado e garantir a segurança alimentar. A longevidade dos grãos e sementes é dependente de suas características genéticas, qualidade inicial e condições de armazenamento. Os caroços de algodão, assim como outras oleaginosas, são mais susceptíveis a oxidação devido ao seu conteúdo de óleos ou lipídios, devido à peroxidação lipídica e produção de ácidos graxos, que afetam a qualidade (Schwember; Bradford, 2010). A peroxidação é desencadeada quando o teor de água dos caroços de algodão está acima de 14%

(b.s.). Para otimizar as condições de armazenamento, é recomendado manter o teor de água entre 6 e 8% (b.s.) e um ambiente seco e fresco, ou seja, com baixa temperatura e umidade relativa (Kebede; Balcha, 2024).

2.2 Propriedades Físicas de Produtos Agrícolas

2.2.1 *Propriedades geométricas*

As características físicas dos grãos e sementes constituem parâmetros fundamentais na avaliação da qualidade de produtos alimentícios. A qualidade de produtos agrícolas é comumente associada à uniformidade de tamanho e formato, e espera-se que apresentem padrões consistentes (Gierz et al., 2024). Dentre as propriedades físicas, as características geométricas de forma e tamanho são consideradas fundamentais para o dimensionamento e operação de sistemas de limpeza e classificação de produtos agrícolas (Gürsoy; Güzel, 2010).

O tamanho dos grãos e sementes representa característica qualitativa e quantitativa relevante para o setor agrícola, constantemente submetidos a processos de seleção natural e melhoramento genético ao longo dos anos. Essa importância decorre devido à sua influência na massa das sementes, característica fundamental para a produtividade das culturas, em especial aos cereais, principal fonte de alimentação humana e animal (Boccaccini et al., 2024). A forma dos grãos e sementes está diretamente relacionada ao tipo de desenvolvimento do óvulo, a relação entre esse no fruto e as adaptações relacionadas à dispersão das sementes. Em geral, o formato da semente permanece constante para cada espécie, entretanto pode variar significativamente em algumas famílias (Cervantes et al., 2022).

Os grãos e sementes compõem uma categoria ampla de produtos utilizados em diferentes setores, incluindo a agricultura e diversas indústrias, como a de alimentos e de transporte. As características físicas desses materiais exercem papel determinante em processos essenciais como semeadura, colheita, processamento, classificação, armazenamento e transporte. As dimensões características de largura, comprimento e espessura dos grãos são particularmente relevantes para a definição do tamanho e formato dos orifícios de peneiras e possibilitam a determinação da área superficial e do tamanho equivalente das partículas, informações fundamentais para a modelagem de fenômenos de transferência de calor e massa em operações como secagem, aeração, aquecimento e resfriamento de grãos. Sendo assim, conhecer as propriedades do material a ser processado é requisito fundamental para o

desenvolvimento e a adequação de tecnologias e operações industriais (Gierz et al., 2024; Kaliniewicz et al., 2022).

Através das dimensões características, é possível obter as propriedades de área, perímetro, circularidade e esfericidade. A esfericidade e a circularidade são parâmetros geométricos amplamente empregados na caracterização da forma de produtos agrícolas, pois descrevem o grau de aproximação das partículas em relação a uma esfera ou a um círculo ideal. A esfericidade é um parâmetro geométrico amplamente utilizado em estudos de escoamento de fluidos e nos fenômenos de transferência de calor e massa. De modo geral, a esfericidade expressa o grau de aproximação da forma de uma partícula em relação a uma esfera perfeita e indica a tendência do produto a rolar (Darfour et al., 2022). Entre as definições mais empregadas, destaca-se aquela baseada na relação entre o volume do sólido e o volume de uma esfera de diâmetro equivalente ao maior eixo da partícula, bem como a definição que relaciona a área superficial de uma esfera de mesmo volume à área superficial real do objeto. A circularidade, por sua vez, é determinada a partir da área projetada do grão e do menor círculo que o circunscreve, fornecendo uma medida bidimensional da regularidade da forma (Grace, Ebneyamini; 2021; Mohsenin, 1986). Esses índices são essenciais para o dimensionamento de peneiras, sistemas de classificação e equipamentos de processamento, além de influenciarem os fenômenos de escoamento e transferência de calor e massa em materiais granulares (Anjali et al., 2023).

2.2.2 Propriedades gravimétricas

As propriedades gravimétricas constituem um conjunto de parâmetros fundamentais na caracterização física de grãos e sementes, pois estão diretamente relacionadas à massa e à forma como o material se distribui em um determinado volume. Esses atributos fornecem subsídios importantes para a compreensão do comportamento dos materiais granulares em operações de colheita, beneficiamento, transporte, secagem e armazenamento, além de influenciarem o dimensionamento e a eficiência de equipamentos agrícolas. A análise dessas propriedades permite, ainda, correlacionar características intrínsecas do material com seu desempenho em diferentes sistemas de processamento (Benestante et al., 2023; Darfour et al., 2022).

A massa específica aparente (ρ_{ap}), considera a relação entre a massa do produto e o volume total do recipiente, englobando tanto o volume dos grãos quanto o volume dos espaços intergranulares. Esta propriedade é a base para o cálculo da capacidade de armazenagem estática e para o dimensionamento de sistemas de transporte (Carvalho et al., 2021; Mohsenin,

1986). O comportamento da ρ_{ap} em função do teor de água é inversamente proporcional para a maioria dos grãos, como soja e milho, em que o aumento do teor de água causa uma expansão volumétrica do leito proporcionalmente maior que o ganho de massa, resultando na redução da massa específica aparente. No entanto, em materiais que apresentem estruturas pilosas como o arroz em casca e sementes de dinanath, a interação superficial entre essas estruturas pode levar a comportamentos distintos no arranjo estrutural da massa de produto (Singh et al., 2021; Meera et al., 2019; Mir et al., 2013; Zareiforush et al. 2011). A massa específica unitária (ρ_u) ou massa específica real, refere-se à relação entre a massa do produto e o seu volume real, excluindo qualquer espaço vazio externo. É uma propriedade intrínseca da partícula, essencial para o estudo do comportamento dos grãos em sistemas de armazenamento. A partir da relação entre a massa específica aparente e a massa específica unitária, é possível determinar a porosidade da massa de grãos (Mohsenin, 1986). A porosidade é definida como a razão entre o volume dos vazios intergranulares e o volume total do sistema. Esse parâmetro exerce influência direta sobre a permeabilidade do meio, afetando a resistência ao fluxo de ar, a eficiência da aeração e os mecanismos de troca de calor e de massa em sistemas de secagem e armazenamento de grãos (Ikegwu, 2023; Anandakumar et al., 2022; Sangamithra et al., 2016; Mohsenin, 1986).

O peso de mil grãos (PMG) constitui um importante indicador do grau de maturação fisiológica e do nível de enchimento das sementes ao final do ciclo reprodutivo. Do ponto de vista fisiológico, esse parâmetro reflete o acúmulo de matéria seca nos tecidos de reserva, incluindo amido, proteínas e lipídios, bem como a fração hídrica associada à estrutura celular, sendo condicionado tanto por fatores genéticos quanto pelas condições ambientais durante o desenvolvimento da cultura. O PMG aumenta linearmente de acordo com o teor de água dos grãos (Anjali et al., 2023; Mir et al., 2013).

2.2.3 Propriedades ópticas

A aparência visual é um dos principais critérios utilizados pelos consumidores na avaliação e escolha de alimentos, sendo amplamente empregada ao longo de toda a cadeia produtiva como indicador de qualidade (Kays, 1999). Essa avaliação envolve atributos como tamanho, forma, frescor, ausência de defeitos e sobretudo, a cor, que se destaca como um dos mais relevantes parâmetros sensoriais (Costa et al., 2011). A cor fornece informações imediatas sobre o estado de conservação, o grau de maturação, a variedade e a aceitabilidade do produto, exercendo influência direta na percepção de qualidade e na decisão de compra. Por essa razão,

a cor é frequentemente utilizada como critério de classificação e controle de qualidade durante o processamento e o armazenamento de alimentos (Anjali et al., 2023; Wu; Sun, 2013).

A cor constitui uma percepção visual resultante da interação entre a radiação luminosa do espectro visível e a superfície dos objetos, sendo determinada pela distribuição espectral da luz refletida ou emitida (Hunt, 1995). Essa informação luminosa é captada pelos fotorreceptores da retina e convertida em sinais nervosos, que são transmitidos ao cérebro por meio do nervo óptico, onde ocorre a interpretação e a atribuição da sensação de cor. Dessa forma, a cor não pode ser considerada uma propriedade inerente ao material, uma vez que variações na fonte de iluminação podem modificar significativamente a aparência cromática do objeto (Melendez-Martinez et al., 2005). Além disso, a percepção da cor é um fenômeno complexo, influenciado simultaneamente pelas características físicas do objeto, pelas condições de iluminação, pelas propriedades fisiológicas do sistema visual humano e pelos ângulos de incidência da luz e de observação (Wu; Sun, 2013).

A percepção da cor pelo ser humano ocorre devido à resposta diferencial de três tipos de cones presentes na retina, sensíveis a distintas faixas do espectro visível, o que permite descrever qualquer sensação cromática a partir de três componentes básicos, conhecidos como valores triestímulos. Com base nesse princípio, foram desenvolvidos diferentes espaços de cor, incluindo aqueles orientados à percepção humana e os espaços instrumentais, utilizados em sistemas de medição padronizados. Entre estes, destacam-se os espaços definidos pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE), dentre eles o espaço CIELAB ($L^*a^*b^*$) é o mais empregado na avaliação da cor de alimentos, por apresentar distribuição uniforme das cores e permitir que diferenças numéricas entre coordenadas representem, de forma aproximada, as diferenças percebidas visualmente pelo olho humano (Leon et al., 2006).

A cor do algodão é caracterizada principalmente por parâmetros associados à luminosidade e à dominância cromática, sendo sua quantificação realizada, de forma consagrada, pelo sistema Hunter Lab. Esse modelo cromático fundamenta-se em três componentes independentes, o R_d , que expressa a refletância da superfície do material, e a e b , que definem variações cromáticas ao longo dos eixos vermelho-verde e amarelo-azul, respectivamente. A polaridade desses eixos indica a predominância das tonalidades correspondentes, com sinais positivos e negativos associados às extremidades de cada espectro. Considerando que a coloração natural da maioria das fibras de algodão se concentra em uma faixa próxima ao padrão 10YR da escala Munsell, as oscilações do componente a tendem a ser pouco expressivas. Em razão disso, a avaliação instrumental da cor do algodão prioriza a determinação do índice de refletância e do componente amarelo, parâmetros que sintetizam de

forma adequada as variações cromáticas observadas nesse material (Li et al., 2023; Nickerson et al., 1950).

No contexto desta pesquisa, a compreensão colorimétrica da fibra se justifica, uma vez que após o descaroçamento os caroços de algodão retêm uma expressiva camada de fibras curtas aderidas ao tegumento (línter). Consequentemente, a cor, a refletância e as variações cromáticas observadas na massa granular desses caroços são intrinsecamente determinadas por esse resquício fibroso.

2.2.4 Propriedades aerodinâmicas

A velocidade terminal e o coeficiente de arrasto destacam-se entre as principais propriedades aerodinâmicas a serem consideradas em operações de transporte pneumático, separação, limpeza, aeração e secagem de produtos agrícolas. A velocidade terminal corresponde à condição em que a partícula permanece em suspensão estável em um escoamento vertical de ar e pode ser determinada por diferentes abordagens experimentais, como os métodos de queda livre, túnel de vento vertical e elutriador. Além da determinação experimental, a velocidade terminal pode ser estimada por meio de modelos teóricos, desenvolvidos a partir de princípios da mecânica dos fluidos e validados em estudos laboratoriais (Gürsoy; Güzel, 2010; Mohsenin, 1986; Grift et al., 1997).

O coeficiente de arrasto aerodinâmico (C_d) é um parâmetro fundamental para a estimativa da força de arrasto (F_d) exercida sobre uma partícula em movimento no ar. Seu valor é influenciado tanto pelas propriedades da partícula, como massa específica, área projetada, forma geométrica e velocidade terminal, quanto pelas condições do escoamento do ar. Em produtos agrícolas, a determinação desse coeficiente pode ser complexa, uma vez que a irregularidade da forma e a constante variação de orientação das partículas ao longo do escoamento resultam em mudanças contínuas da área projetada e consequentemente, do coeficiente de arrasto (Gürsoy; Güzel, 2010).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos e Laboratório de Classificação Física do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem e Assuntos Afins (CENTREINAR), localizado no campus da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil (20°45'00" S, 42°56'15" O; 643 m de altitude).

3.1 Preparo das amostras

O material de estudo constituiu-se de caroços de algodão da cultivar IMA 5801 B2RF, provenientes de unidades armazenadoras situadas no município de Correntina, Bahia. As amostras foram acondicionadas em embalagens de polipropileno (big bags) e transportadas até a Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais, onde foram conduzidos os ensaios.

O estudo avaliou o produto em duas condições de beneficiamento: com linter e deslintado (Figura 1). Os caroços de algodão deslintados foram fornecidos pela unidade de beneficiamento já submetidos ao processo de deslintamento, realizado pelo método químico por via úmida, utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4), na concentração de 8%, acrescido de 1% de agente antiespumante, diluídos em água, seguido de neutralização utilizando carbonato de cálcio ($CaCO_3$).



Figura 1. Caroços de algodão com linter (esquerda) e deslintado (direita).

Visando a remoção de impurezas e materiais estranhos presentes na massa granular, os caroços de algodão com línter e deslintados foram submetidos a uma etapa de pré-limpeza. Portanto, realizou-se o peneiramento manual utilizando uma peneira metálica com perfurações oblongas (10” x 3/4”). Para os caroços de algodão com línter, realizou-se ainda a remoção manual das impurezas aderidas ao línter, assegurando a integridade do material de análise.

O teor de água inicial foi determinado pelo método gravimétrico, conforme as Regras para Análise de Sementes – RAS. Para cada amostra de caroços de algodão com línter e deslintados, foram realizadas quatro repetições de 5 g, acondicionadas em cápsulas metálicas e submetidas a uma estufa de circulação forçada em temperatura constante de $105 \pm 1^\circ\text{C}$ por 24 horas (Brasil, 2009).

Para a aquisição de caroços de algodão com línter com teores de água mais elevados, a colheita foi realizada antes da abertura natural dos capulhos e o descaroçamento e remoção da fibra realizados manualmente. O ajuste dos diferentes níveis de teor de água foi realizado em secador de bandejas (Graiman, modelo 6623) à temperatura de 50°C . Ressalta-se que, devido às etapas do processo de deslintamento, o teor de água máximo obtido para os caroços deslintados limitou-se a $0,092 \text{ kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$, em base seca (b.s.).

3.2 Propriedades Geométricas

3.2.1 Forma e tamanho

Utilizou-se um paquímetro digital (Mitutoyo, modelo 500-147B 200mm/8”) com 0,01 mm de precisão, para obter as dimensões características de (a) comprimento, (b) largura e (c) espessura de 10 grãos de caroço de algodão com línter e deslintados (Figura 2), contendo teores de água de 0,220; 0,096; 0,064; 0,054 e 0,036 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.) para caroços de algodão com línter e 0,092; 0,063; 0,052 e 0,036 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.) para caroços de algodão deslintados.

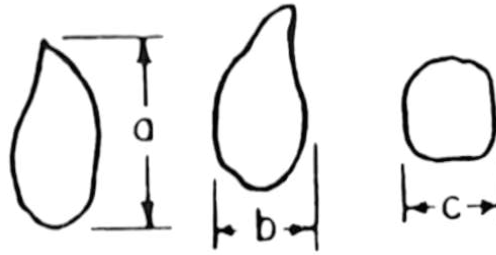


Figura 2. Dimensões características de (a) comprimento, (b) largura e (c) espessura para caroços de algodão com línter e deslinterados.

Fonte: Mohsenin (1986).

A partir das dimensões características dos caroços de algodão com línter e deslinterados, devido ao seu formato cônico-esférico, o volume e a área superficial foram determinados pelo método proposto por Jain e Bal (1997), conforme as Equações 01 e 02, respectivamente (Araújo et al., 2020). A esfericidade (Equação 03), circularidade (Equação 04), área projetada (Equação 05) e diâmetro geométrico (Equação 06) foram determinados conforme Mohsenin (1986).

$$V = \frac{\pi b c a^2}{6 \left[2a - (bc)^{\frac{1}{2}} \right]} \quad (01)$$

$$A_s = \frac{\pi (bc)^{\frac{1}{2}} a^2}{\left[2a - (bc)^{\frac{1}{2}} \right]} \quad (02)$$

$$E = \left[\frac{(abc)^{\frac{1}{3}}}{a} \right] \times 100 \quad (03)$$

$$C = \frac{b}{a} \times 100 \quad (04)$$

$$A_p = \frac{\pi ab}{4} \quad (05)$$

$$D_g = (abc)^{\frac{1}{3}} \quad (06)$$

Em que: a – comprimento, mm; b – largura, mm; c – espessura, mm; V – volume unitário, mm³; A_s – área superficial, mm²; E – esfericidade, %; C – circularidade, %; A_p – área projetada, mm² e D_g – diâmetro geométrico, mm.

3.3 Propriedades Gravimétricas

3.3.1 Massa específica

A massa específica aparente (ρ_{ap}) e massa específica unitária (ρ_u) foram determinadas para os caroços de algodão com línter e deslintados. A massa específica aparente, definida como a relação entre a massa do produto e o volume total ocupado, considerando os espaços vazios intergranulares, foi obtida utilizando um recipiente cilíndrico metálico padronizado, conhecido como One Pint Dry, com massa e volume interno constantes, correspondendo a 601,95 g e 551,91 cm³, respectivamente.

O procedimento consistiu em despejar os caroços de algodão a uma altura constante de 30 cm sobre a borda do recipiente, simulando o preenchimento por queda livre. Após o preenchimento, realizou-se o nivelamento da superfície com auxílio de uma régua para remoção do material excedente, garantindo a ocupação do volume exato do recipiente. A massa da amostra foi mensurada em balança de precisão de 0,01 g (Ohaus, modelo E1B120). A partir dos dados de massa e volume obtidos, calculou-se a massa específica aparente conforme a Equação 07. O experimento foi conduzido com 10 repetições para cada teor de água dos produtos.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{v} \quad (07)$$

Em que: ρ_{ap} – massa específica aparente, kg.m⁻³; m – massa do caroço de algodão, kg; v – volume do one pint dry, m³.

A massa específica unitária (ρ_u) equivale à relação entre a massa de um único caroço de algodão e seu volume, desconsiderando o espaço intergranular. Essa foi determinada pelo método do deslocamento de líquido a temperatura ambiente, utilizando um picnômetro tipo Hubbard (25 ml) com tampa perfurada. Para esse trabalho, utilizou-se o tolueno como líquido de imersão, devido à sua baixa capacidade de penetração na matriz porosa e por não alterar o teor de água do produto durante a medição, conforme metodologia descrita por Darfour et al. (2022).

Inicialmente, determinou-se a massa do picnômetro vazio e a massa da amostra, composta por três caroços de algodão, visando a adequação ao volume do frasco. Em seguida, foi obtida a massa do picnômetro totalmente preenchido com tolueno. Para a padronização do

experimento, devido à alta volatilidade do tolueno, cobriu-se a tampa do picnômetro com plástico filme e a massa registrada 60 segundos após ser colocado na balança digital com precisão de 0,0001 g (Marte, modelo AY220) (Benestante et al., 2023). A seguir, os caroços de algodão foram imersos no picnômetro preenchido com tolueno, promovendo o extravasamento do líquido. O volume deslocado corresponde ao volume real dos caroços de algodão. Realizou-se a pesagem final do sistema (picnômetro + tolueno residual + caroços de algodão) para o cálculo do volume deslocado. O experimento foi conduzido com 10 repetições por tratamento, sendo a massa específica unitária calculada através da Equação 08.

$$\rho_u = \frac{m}{v} \quad (08)$$

Em que: ρ_u – massa específica unitária, kg.m^{-3} ; m – massa do caroço de algodão, kg; e v – volume do caroço de algodão, m^3 .

3.3.2. Porosidade

A porosidade foi determinada indiretamente, a partir da relação entre a massa específica unitária e a massa específica aparente, conforme a Equação 09, proposta por Mohsenin (1986).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_u} \quad (09)$$

Em que: ε – porosidade, %; ρ_{ap} – massa específica aparente, kg.m^{-3} ; ρ_u – massa específica unitária, kg.m^{-3} .

3.3.3. Peso de mil grãos

O peso de mil grãos (PMG) foi determinado conforme as Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009) para cada teor de água avaliado. Utilizaram-se oito subamostras contendo 100 caroços de algodão cada, escolhidos aleatoriamente, cuja massa foi aferida em balança analítica digital com precisão de 0,0001 g (Marte, modelo AY220). Em seguida, os valores médios foram extrapolados para corresponder à massa de 1.000 caroços de algodão, conforme a Equação 10.

$$PMG = \frac{P_a \times 100}{n} \quad (10)$$

Em que: PMG – massa de mil grãos, g; P_a – peso da amostra, g; n – número de grãos utilizados.

3.4 Propriedades ópticas

3.4.1 Cor

A análise colorimétrica para os caroços de algodão com línter e deslintados, foi realizada empregando um colorímetro de bancada HunterLab (Mini Scan XE Plus, modelo 45/0-L), calibrado com iluminante D e observador padrão de 10°. O equipamento foi utilizado para obter as coordenadas cromáticas no sistema de cores CIELAB ($L^*a^*b^*$), em que L^* representa a luminosidade (0 = preto e 100 = branco), a^* corresponde o eixo vermelho (+) e verde (-) e a coordenada b^* define o eixo amarelo (+) e azul (-) (Mokbul et al., 2023).

Para a leitura, as amostras de caroços de algodão foram acondicionadas em um recipiente cilíndrico de vidro transparente, garantindo seu completo preenchimento para que toda a superfície de leitura fosse coberta. Em seguida, o recipiente contendo as amostras foi posicionado no colorímetro e coberto com uma tampa preta para evitar interferência da luz externa. O experimento contou com 10 repetições para cada nível de teor de água e tipo de beneficiamento. A partir dos valores médios das coordenadas $L^*a^*b^*$, calcularam-se os índices de saturação ou croma (C^*) e o ângulo de tonalidade ou Hue (h°) conforme as Equações 11 e 12, respectivamente.

$$C_r = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (11)$$

$$h^\circ = \text{atan}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (12)$$

3.5 Propriedades aerodinâmicas

A velocidade terminal (V_t) foi determinada experimentalmente utilizando um secador de bandejas (Grainman, modelo 6623) adaptado para o fornecimento de fluxo de ar vertical. O

procedimento consistiu no posicionamento individual dos caroços de algodão na câmara de secagem, seguido do ajuste manual da vazão de ar através do dispositivo de admissão frontal. O fluxo foi incrementado gradualmente até que o produto atingisse o estado de suspensão estável ou equilíbrio dinâmico na corrente de ar.

A velocidade do ar necessária para manter a partícula em flutuação foi mensurada utilizando um termo-anemômetro de hélice (Instrutherm, modelo TAD-500), com precisão de $0,1 \text{ m.s}^{-1}$. A partir dos dados experimentais de velocidade terminal, associados às características físicas dos caroços e às propriedades do ar, calculou-se o coeficiente de arrasto total (Equação 13), a força de arrasto (Equação 14) e o número de Reynolds (Equação 15), conforme fundamentação teórica proposta por Marathe et al. (2017) e Mohsenin (1986).

$$C_d = \frac{2m_p g(\rho_p - \rho_f)}{V_t^2 \rho_p \rho_f A_p} \quad (13)$$

$$F_d = \frac{C_d \rho_f A_p V_t^2}{2} \quad (14)$$

$$Re = \frac{V_t D_g \rho_f}{\mu} \quad (15)$$

Em que: C_d – coeficiente de arrasto total, adimensional; V_t – velocidade terminal, m.s^{-1} ; m_p – massa do produto, kg; g – aceleração da gravidade, $9,81 \text{ m.s}^{-2}$; ρ_p – massa específica do produto, kg.m^{-3} ; ρ_f – massa específica do fluido (ar), kg.m^{-3} ; A_p – área projetada do produto, m^2 ; F_d – força de arrasto, N; Re – número de Reynolds, adimensional; D_g – diâmetro geométrico, m; μ – viscosidade do ar, kg.m.s^{-1} .

3.6 Análise Estatística

A influência do teor de água sobre as propriedades físicas dos caroços de algodão com línter e deslintados foi avaliada por meio de análise de regressão. Os modelos matemáticos foram ajustados independentemente para cada variável resposta. A qualidade do ajuste foi verificada pelo coeficiente de determinação (R^2) e a significância dos coeficientes de regressão foi testada pelo teste t, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$). O processamento dos dados e a elaboração dos gráficos foram realizados utilizando o software estatístico SigmaPlot, versão 16.0 (Grafiti LLC, 2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades Geométricas

4.1.1 Forma e tamanho

Os valores experimentais médios e as equações de regressão ajustadas para as dimensões características de comprimento (a), largura (b), espessura (c) e diâmetro geométrico (D_g) para os caroços de algodão com linter e deslintados, em função do teor de água, estão apresentados na Figura 3.

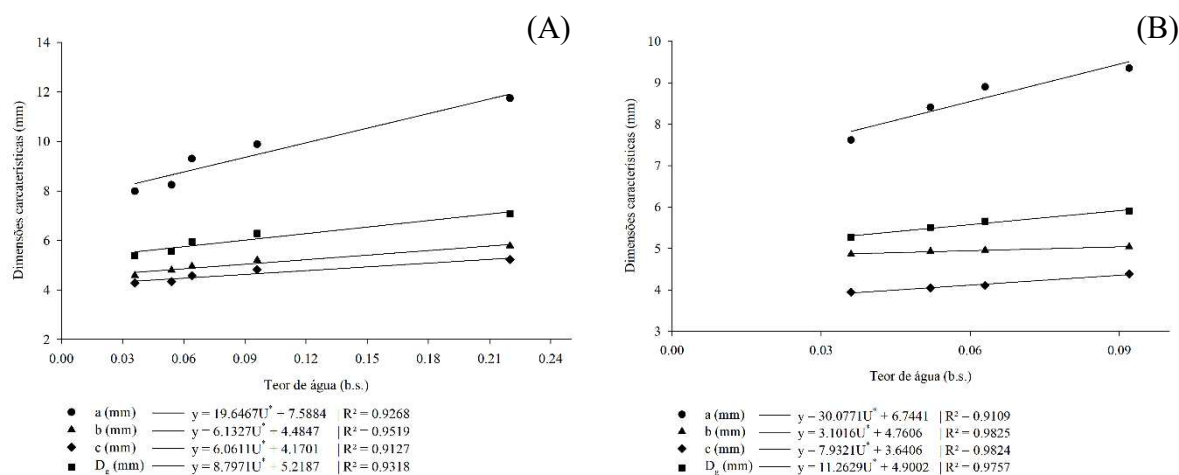


Figura 3. Influência do teor de água nas dimensões características de comprimento (a), largura (b), espessura (c) e diâmetro geométrico (D_g) para os caroços de algodão com linter (A) e deslintados (B).

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste “t”.

Fonte: A Autora (2026).

A análise de regressão demonstrou que o modelo linear representou satisfatoriamente o comportamento dimensional para ambos os produtos dentro da faixa de teor de água estudada. Observou-se uma correlação linear positiva para todas as dimensões avaliadas, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,91 para todas as variáveis. Esse comportamento pode ser explicado pela contração volumétrica dos grãos em função da redução do teor de água, uma vez que a remoção de água dos espaços intergranulares e capilares promove a diminuição dos tecidos celulares e das fibras (Gojiya et al., 2023; Mohsenin, 1986).

A análise das dimensões axiais em função do teor de água apresenta comportamentos semelhantes para os caroços de algodão com línter (A) e deslintados (B), com diferenças em relação à magnitude das dimensões características. O comprimento, a largura, a espessura e o diâmetro geométrico dos caroços de algodão com línter variaram de 7,99 a 11,75 mm, 4,58 a 5,78 mm, 4,28 a 5,23 mm e 5,38 a 7,07 mm, respectivamente, à medida que o teor de água aumentou de 0,036 para 0,220 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.). Para os caroços deslintados, os valores observados encontravam-se entre 7,62 e 9,36 mm, 4,86 e 5,04 mm, 3,95 e 4,39 mm e 5,26 e 5,91 mm para o mesmo conjunto de dimensões, quando o teor de água variou de 0,036 para 0,092 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.). O comportamento identificado neste estudo é consistente com resultados reportados na literatura. Manimehalai e Viswanarhan (2006), avaliando caroços de algodão com línter em teores de água entre 0,082 e 0,084 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.), observaram o aumento nas dimensões características com a elevação do teor de água. De maneira semelhante, Zheng et al. (2023), ao analisarem caroços de algodão deslintados de três variedades, com teor de água de 0,06; 0,09; 0,12 e 0,15 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.), também registraram tendência de crescimento das dimensões axiais em função do aumento do teor de água.

Em média, os caroços de algodão com línter apresentaram maiores dimensões que caroços de algodão deslintados, com exceção da dimensão 'b', que em geral apresentou maiores valores para os caroços de algodão deslintados. A remoção das fibras (deslintamento) resultou na redução das dimensões absolutas iniciais. O diâmetro geométrico médio teórico para o produto seco ($U^* = 0$) reduziu-se de 5,22 mm (com línter) para 4,90 mm (deslintado). Essa diferença corresponde à espessura da camada de línter removida pelo ácido durante o beneficiamento.

A análise de regressão para o volume (V), área superficial (A_s), área projetada (A_p) e perímetro (P) dos caroços de algodão com línter e deslintados, em função do teor de água, estão apresentados na Figura 4. Evidenciou-se uma dependência linear positiva para todas as variáveis geométricas em relação ao teor de água, para ambos os produtos ($R^2 > 0,92$). O aumento dessas variáveis é consequência direta da expansão dimensional (a, b, c) analisadas anteriormente.

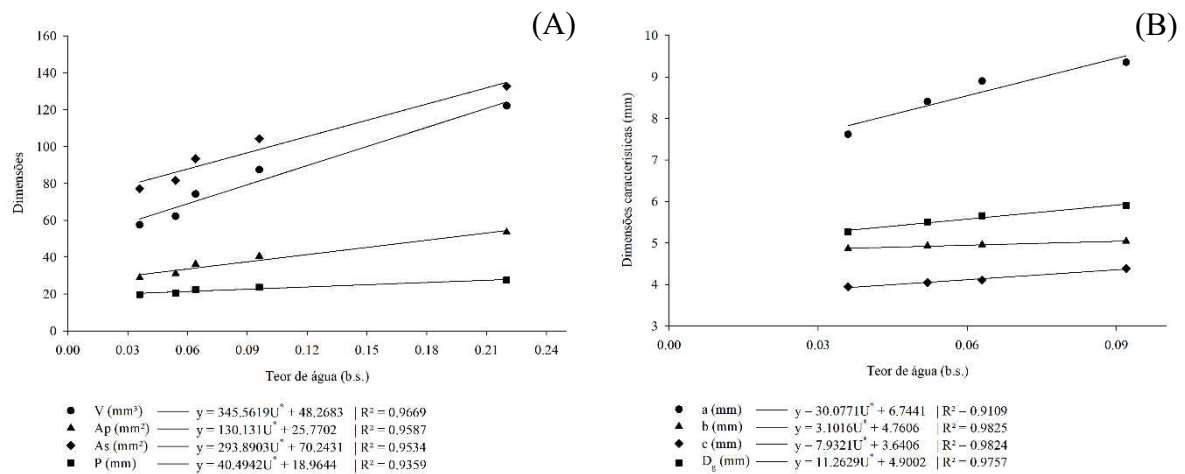


Figura 4. Médias de volume (V), área projetada (Ap), área superficial (As) e perímetro (P) para os caroços de algodão com línter (A) e deslintados (B), em função do teor de água.

*Significativo a 5%

Fonte: A autora (2026)

A análise de regressão para esfericidade (E) e circularidade (C) indicou uma correlação linear negativa para ambos os índices de forma em relação ao teor de água, independentemente do tipo de produto (Figura 5). Isso significa que, à medida que o teor de água aumenta, o caroço de algodão afasta-se da forma geométrica ideal de uma esfera ou círculo, tornando-se mais alongado ou irregular. Como o comprimento do caroço de algodão (a) aumenta a uma taxa muito superior à da largura (b) e espessura (c), os produtos sofrem um alongamento, assumindo um formato mais elipsoidal ou oblongo, distanciando-se da forma esférica e circular.

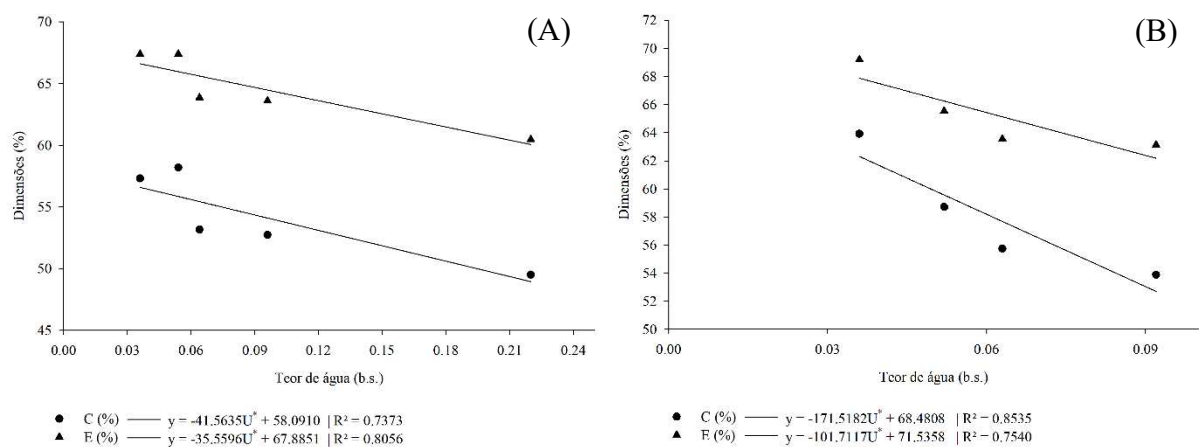


Figura 5. Circularidade (C) e esfericidade (E) para caroços de algodão com línter (A) e deslintados (B).

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste “t”.

Fonte: A Autora (2026).

Esses resultados corroboram com os encontrados para caroços de algodão por Vinayaka et al. (2020) e Zheng et al. (2023), que observaram valores médios de esfericidade em torno de 66% para teor de água de $0,753 \text{ kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.) e superiores a 60% para teores variando de 0,06 a $0,15 \text{ kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.), respectivamente. Produtos agrícolas com formato cônico-esférico, como sementes de gergelim (Quoc et al., 2025), sementes de limão (Benestante et al., 2023), cevada (Carvalho et al., 2021) e psyllium (Hashemifesharaki, 2020), apresentam esfericidade e circularidade inferiores a 90%, sendo, portanto, classificados como não circulares e não esféricos.

A caracterização das propriedades geométricas constitui a base para o projeto de máquinas e equipamentos de pós-colheita. Enquanto o diâmetro geométrico determina a abertura e formato dos crivos nos equipamentos de classificação, a esfericidade indica a tendência do comportamento de rolagem do produto. Variáveis como a área superficial são fundamentais para o projeto de estruturas de fluxo, definindo a geometria e a inclinação de equipamentos de escoamento. Parâmetros como área projetada e porosidade são determinantes na modelagem dos fenômenos de transporte de energia e processos de taxa de transferência de calor (Benestante et al., 2023; Darfour et al., 2022). Nesse contexto, a determinação dessas propriedades físicas para caroços de algodão, com línter e deslintados, torna-se indispensável para a otimização tecnológica dos maquinários de processamento, beneficiamento e armazenamento.

4.2 Propriedades Gravimétricas

4.2.1. Massa específica

A partir da Figura 6, é possível observar a relação entre a massa específica unitária (ρ_u) e a massa específica aparente (ρ_{ap}) em função do teor de água para os caroços de algodão com línter (A) e deslintados (B).

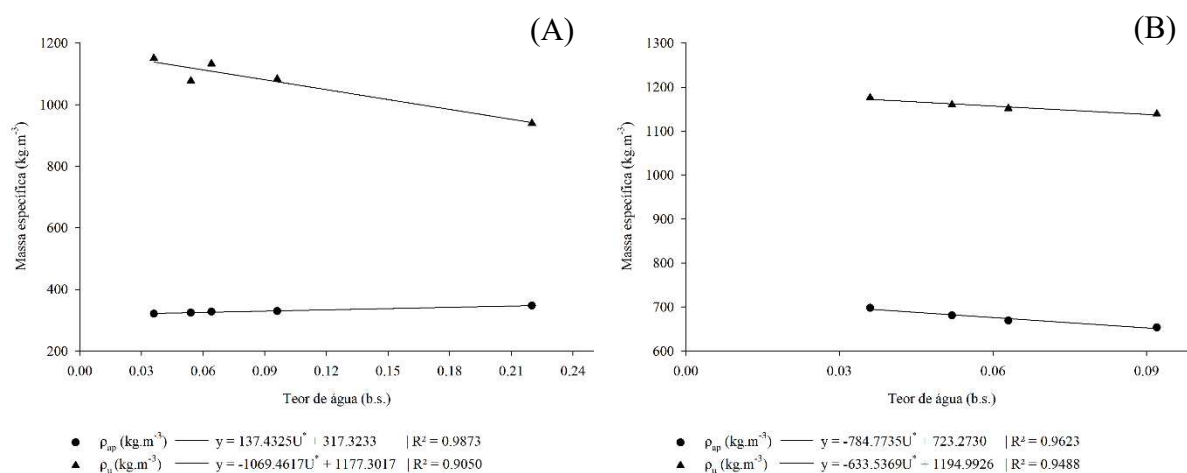


Figura 6. Massa específica unitária (ρ_u) e a massa específica aparente (ρ_{ap}) em função do teor de água para os caroços de algodão com linter (A) e deslintados (B).

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste “t”.

Fonte: A Autora (2026).

Para os caroços de algodão com linter, ambas as variáveis apresentaram comportamento linear em relação ao teor de água. Entretanto, observa-se que ρ_{ap} aumenta conforme o teor de água se eleva, enquanto ρ_u apresenta correlação negativa, indicando redução da massa específica unitária com o aumento do teor de água. Esse comportamento também foi observado por Manimehalai e Viswanathan (2006) para caroços de algodão com linter em três variedades e teores de água entre 0,0820 e 0,0894 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.). Os caroços de algodão deslintados, por sua vez, apresentaram para ambas as propriedades um ajuste linear negativo, portanto a massa específica aparente e unitária dos produtos reduzem conforme o aumento do teor de água. Tais resultados corroboram com os encontrados por Özarlan (2002) ao analisar caroços de algodão deslintados em teor de água variando de 0,1364 a 0,1628 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.). A relação linear negativa para a massa específica unitária pode ser explicada pelo fato de que a absorção de água provoca a expansão dos tecidos dos caroços de algodão, levando ao aumento do seu volume. Entretanto, esse incremento volumétrico não é acompanhado por um aumento proporcional da massa, resultando em uma redução do valor final da massa específica unitária (Manimehalai; Viswanathan, 2006; Bajpai et al., 2020). A mesma tendência foi avaliada para sementes como cevada (Carvalho et al., 2021), psyllium (Hashemifesharaki, 2020), jamelão (Bajpai et al., 2020) e abóbora (Igbozulike; Amamgbo, 2019).

Ao comparar os valores de ρ_u para os caroços de algodão com linter e deslintados, observa-se que para ambos os produtos, essa apresentou valores maiores que a massa específica

aparente. A massa específica unitária refere-se à relação entre a massa e o volume do produto individual, sem considerar os espaços vazios entre elas, sendo assim, são esperados valores maiores para a massa específica unitária (Carvalho et al., 2021). Ao comparar os tratamentos em faixas semelhantes de teor de água (0,036 a 0,092 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$, b.s.), nota-se que os caroços deslintados apresentaram valores de ρ_u entre 2,9% e 5,3% superiores aos observados para os caroços com línter. Enquanto o produto deslintado registrou médias estimadas de 1139,08 a 1175,73 $\text{kg}.\text{m}^{-3}$, os caroços com línter registraram valores ligeiramente menores, variando de 1083,45 a 1150,79 $\text{kg}.\text{m}^{-3}$ nas mesmas condições de teor de água.

Da mesma forma, nota-se que a massa específica aparente apresentou valores superiores para os caroços de algodão deslintados, alcançando valores aproximadamente duas vezes maiores que aqueles obtidos para os caroços com línter sob teores de água semelhantes. Essa diferença pode ser atribuída ao arranjo espacial das partículas, em que as fibras do línter atuam como espaçadores físicos, impedindo o contato direto entre os caroços de algodão e criando grandes vazios intergranulares, o que reduz drasticamente a massa de produto que pode ser alocada em um mesmo volume, enquanto nos caroços de algodão deslintados, com superfície mais regular, tendem a se organizar de forma mais compacta. Singh et al. (2021) ao analisarem sementes *dinanth* (*Pennisetum pedicellatum*) com e sem pilosidade, encontraram maiores médias de massa específica aparente para as sementes sem pilosidade. Os autores afirmam que as estruturas pilosas contribuem para a menor massa específica devido ao aumento do volume de espaços vazios ao redor das sementes proporcionados por essas estruturas, corroborando com os resultados encontrados neste estudo para os caroços de algodão. O mesmo comportamento foi observado em estudos com arroz em casca, em que foi verificado que a massa específica aparente do arroz beneficiado é superior à do arroz em casca. Essa diferença foi atribuída à presença da casca e das aristas, estruturas finas e pontiagudas, que aumentam o volume ocupado e, consequentemente reduzem a massa específica aparente (Meera et al., 2019; Mir et al., 2013; Zareiforush et al., 2011).

4.2.2. Porosidade

Os valores experimentais e as equações de regressão ajustadas para a porosidade da massa granular de caroços de algodão com línter e deslintados, em função do teor de água, estão apresentados na Figura 7 A e B, respectivamente.

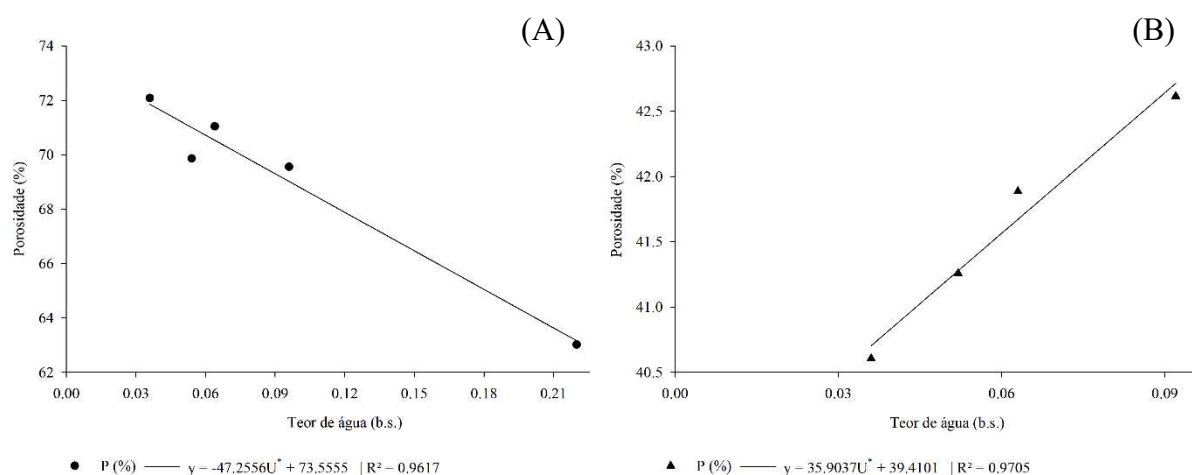


Figura 7. Análise de regressão da influência do teor de água na porosidade de caroços de algodão com linter (A) e deslintados (B).

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste “t”.

Fonte: A Autora (2026).

A porosidade, calculada a partir da relação entre a massa específica aparente (ρ_{ap}) e a massa específica unitária (ρ_u), apresentou ajustes lineares satisfatórios ($R^2 > 0,96$) para ambos os produtos. No entanto, a análise comparativa revela diferenças fundamentais na magnitude dos valores de porosidade e na tendência de variação em relação ao teor de água.

Para os caroços com linter, observou-se porosidade elevada, entre 72% e 63%, e correlacionada negativamente com o teor de água. A redução da porosidade com o aumento do teor de água pode ser explicada matematicamente pela razão entre as massas específicas: o aumento da ρ_{ap} em contraposto à redução da ρ_u promoveu a redução progressiva dos espaços porosos em um mesmo volume. Em estudos realizados com sementes de psyllium, com teor de água variando de 0,0432 a 0,2038, Hashemifesharaki (2020) observou que a porosidade reduziu significativamente de 48,29% para 44,04%. Esse comportamento pode ser explicado com base na expansão volumétrica dos caroços de algodão, fazendo com que os espaços porosos da massa de produto reduzissem proporcionalmente. Como consequência, ocorre redução do volume de vazios intergranulares na massa, uma vez que o volume total do leito permanece constante, levando à redução da porosidade (Dak et al., 2014).

Em contrapartida, os caroços de algodão deslintados apresentaram comportamento crescente, com a porosidade variando de 40,61% para 42,62%, quando o teor de água alterou de 0,036 para 0,092 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.). Esse aumento, deve-se ao fato de que a massa específica apresentou maior influência que a massa específica unitária. Esse comportamento sugere que, com o aumento do teor de água, a expansão individual dos caroços não foi acompanhada por

um rearranjo eficiente das partículas no leito, favorecendo maior formação de espaços intergranulares e consequentemente, maior porosidade. Além disso, a ausência do línter pode reduzir pontos de contato entre os caroços de algodão e modificar sua acomodação no leito granular, contribuindo para o aumento dos vazios internos. Esse efeito possui implicações práticas no escoamento de ar em operações de secagem e aeração, uma vez que maiores valores de porosidade tendem a favorecer a permeabilidade da massa granular. A mesma tendência foi observada para sementes de gergelim (Gojiya et al., 2023), grãos de cevada (Carvalho et al., 2021) e sementes de maçã-estrela africana (Onwe et al., 2020).

4.2.3. *Peso de mil grãos*

A variação do Peso de Mil Grãos (PMG) em função do teor de água para os caroços de algodão com línter e deslinterados está apresentada na Figura 8. A análise de regressão demonstrou que o modelo linear é capaz de representar com alta precisão o comportamento de ambos os produtos, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,98. Observou-se que a massa total dos caroços de algodão aumenta de forma proporcional ao aumento do teor de água. Isso acontece devido a adição da massa de água aos constituintes celulares e estruturas porosas dos produtos.

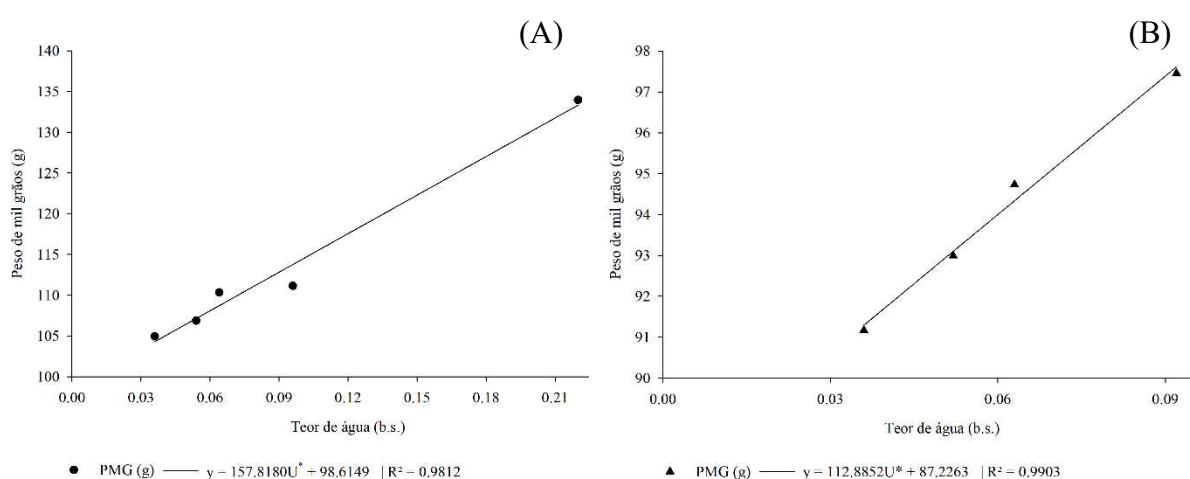


Figura 8. Peso de mil grãos em função do teor de água em caroços de algodão com línter (A) e deslinterados (B).

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste “t”.

Fonte: A Autora (2026).

A comparação entre os coeficientes lineares (interceptos) que representam teoricamente a massa do produto seco ($U^* = 0$), evidencia a contribuição das fibras remanescentes para a massa final do produto. O peso estimado para mil grãos de caroços com linter (Figura 8A) foi de 98,6149 g, enquanto para os caroços deslintados foi de 87,2263 g (Figura 8B). A diferença de aproximadamente 11,4 g entre os dois materiais pode ser atribuída diretamente à massa seca do linter aderida ao grão. Este resultado é consistente com a natureza do processo de deslinteramento químico, que remove a fibra externa, reduzindo assim a massa total dos grãos.

O peso de mil grãos das sementes de dinanath com pilosidade também apresentou médias maiores em comparação às sementes sem essas estruturas (Singh et al., 2021), indicando que a pilosidade das sementes, assim como a linter do caroço de algodão, acresce a massa total do produto. Zheng et al. (2023), encontraram a massa de mil grãos para três variedades de caroços de algodão variando entre 81 g e 96 g, para teores de água entre 0,06 e 0,15 $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.).

4.3 Propriedades ópticas

4.3.1. Cor

A análise colorimétrica dos parâmetros L^* , a^* e b^* para os caroços de algodão com linter e deslintados está apresentada na Figura 9. Os dados experimentais evidenciam uma relação linear entre as dimensões de cor e o teor de água para ambos os materiais.

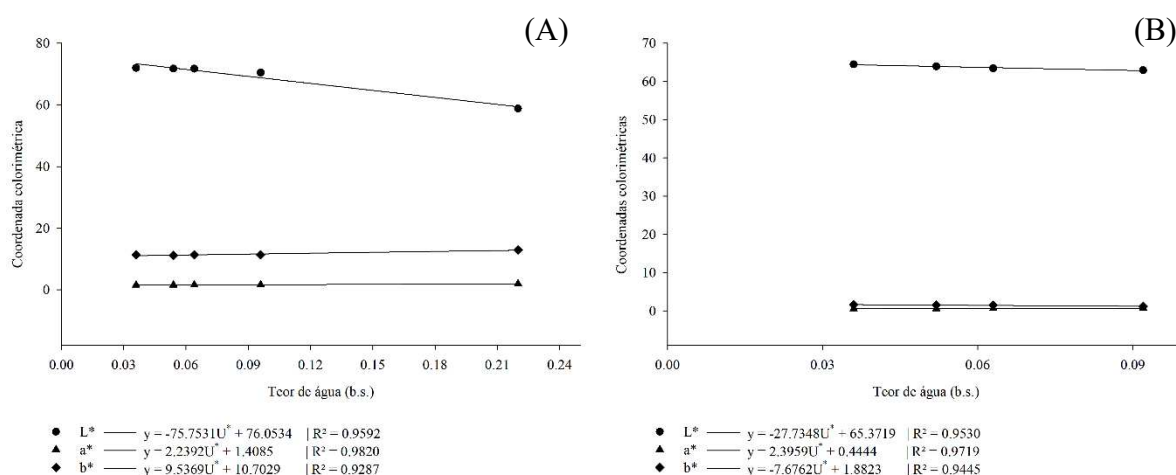


Figura 9. Regressão linear para as dimensões colorimétricas do espaço $L^*a^*b^*$ para caroços de algodão com linter (A) e deslintados (B).

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste “t”.

Fonte: A Autora (2026).

Para os caroços de algodão com línter (Figura 9A), os valores médios de luminosidade (L^*) variaram de 58,79 a 71,97, indicando uma cor predominantemente clara, com tendência para o branco, devido à coloração esbranquiçada do línter. O línter é o remanescente das fibras de algodão que ficam aderidas ao caroço após o descaroçamento. Essas podem ser naturalmente encontradas em tons de branco, marrom e verde (Liu et al., 2018).

O processo de deslinteramento químico alterou drasticamente o perfil colorimétrico do produto (Figura 9B). Os caroços deslintados apresentaram luminosidade média (L^*) variando de 64,49 para 62,92, quando o teor de água aumentou de 0,036 para 0,092 $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.), caracterizando visualmente o produto com uma coloração cinza opaca. As variações observadas na coloração dos caroços de algodão deslintados não se devem apenas à remoção das fibras de línter, mas também à presença do neutralizante aplicado após o tratamento ácido. Esse resíduo sólido atua como uma fina camada superficial que modifica a refletância do produto, resultando em parâmetros de cor distintos dos caroços com línter.

Observou-se uma correlação negativa para a variável L^* , tanto para os caroços de algodão com línter, quanto para os deslintados, indicada pelo coeficiente angular da equação ajustada de -75,7531 e -27,7348, respectivamente. Esse comportamento demonstra que o aumento do teor de água reduz os valores de L^* , tornando o material menos luminoso. Tal redução pode ser atribuída à alteração nas características espectrais da luz refletida pela superfície do caroço e pode ser explicada pelos princípios ópticos de interação da luz em meios porosos, fundamentando-se em princípios ópticos de meios porosos análogos aos aplicados na física de solos. A presença da água altera o índice de refração do meio e afeta a quantidade de luz dispersa. No estado seco, a luz incidente sobre a superfície sofre reflexão direta difusa, retornando em grande parte ao observador, o que resulta em valores elevados de luminosidade. Em contrapartida, com o aumento do teor de água, poros e capilares são preenchidos com água, o que faz com que os raios de luz sofram refração ao atravessar a interface ar-água. Parte dessa luz é refletida de volta, mas ao atingir novamente a interface água-ar (tentando sair de um meio mais denso para um menos denso), pode ocorrer o fenômeno da reflexão interna total, dependendo do ângulo de incidência. Esse fenômeno faz com que múltiplos raios de luz fiquem "aprisionados" na película de água ou sejam absorvidos pelo tegumento, reduzindo significativamente a quantidade de luz que é refletida de volta para a superfície (Gadi et al., 2020; Khir et al., 2014). O resultado dessa interação óptica é a percepção de uma superfície mais escura, corroborando a queda acentuada dos valores de L^* observados neste estudo.

Analisando as variáveis a^* e b^* nos caroços de algodão com línter, ambos apresentaram resultados positivos ($+a^*$ e $+b^*$), sugerindo que as coordenadas estão mais voltadas para as

pigmentações vermelha e amarela, respectivamente. A cor básica da fibra do algodão é classificada como amarelo-avermelhado (10YR) pela cartela de Munsell, sendo a pigmentação amarela a dominante (Li et al., 2023). Essa coloração se dá em razão da presença do gossipol, substância amarela cristalina fortemente colorida presente nos caroços de algodão (Renner et al., 2022).

Para os caroços de algodão deslintados, as coordenadas cromáticas (a^* e b^*) mantiveram-se próximas de zero em toda a faixa de teor de água estudada, confirmando a natureza acromática (cinza neutro) do produto processado. Tais resultados podem ser explicados pela coloração acinzentada e de baixo brilho, resultante do processo de deslintamento, características que puderam ser visualmente observada nos caroços de algodão deslintados usados neste estudo, justificando os valores neutros encontrados. É notável a inversão de comportamento da coordenada b^* em comparação ao produto com línter, em que no produto deslintado, o coeficiente angular foi negativo (-7,67), indicando que um maior teor de água tende a neutralizar qualquer resquício de pigmentação amarelada, tornando o cinza ainda mais puro (neutro).

A Figura 10 mostra as variáveis de saturação (croma) e ângulo hue (tom) calculadas a partir da interação entre as coordenadas a^* e b^* , para os caroços de algodão com línter (A) e deslintados (B).

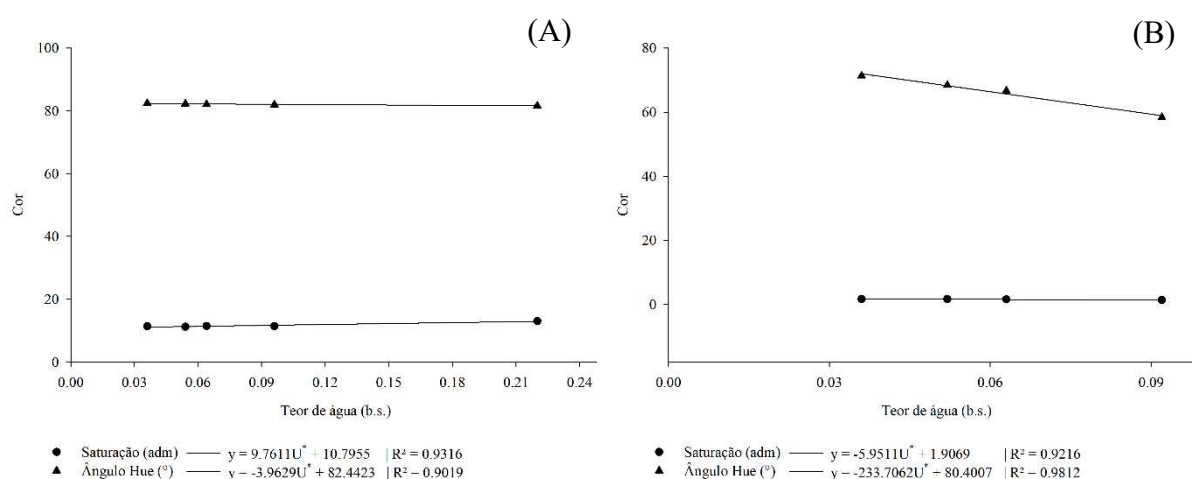


Figura 10. Regressão linear para as propriedades de saturação (S) e ângulo hue (h°) para caroços de algodão com línter (A) e deslintados (B).

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste “t”.

Fonte: A Autora (2026).

A saturação indica a intensidade da cor de um produto, sendo que quanto maior seus valores, mais “viva” e intensa é a cor. Desta forma, observa-se que os caroços de algodão com linter (Figura 10A) apresentam saturação com tendência linear positiva, variando entre 11,22 e 13,03. Esses valores médios indicam que o produto é levemente saturado, pouco vibrante, mas ainda assim com uma leve presença de cor. O ângulo hue, situou-se na faixa entre 81,61° e 82,42°, posicionando a cor no primeiro quadrante do diagrama cromático (0 a 90°). O valor próximo a 90° confirma que a matiz predominante é amarela. Observou-se uma ligeira redução linear do ângulo com o aumento do teor de água, sugerindo um leve desvio da matiz amarela pura em direção ao vermelho, provavelmente causada pela exposição do tegumento marrom, abaixo da camada de linter.

Os caroços deslintados (Figura 10B) apresentaram um comportamento colorimétrico característico de materiais acromáticos (neutros). A Saturação (C^*) registrou valores extremamente baixos (entre 1,5 e 2,0), confirmando que a cor resultante do deslinteramento ácido com neutralização por CaCO_3 , é um cinza quase puro, com pouquíssima pigmentação cromática. A regressão indicou uma tendência negativa, ou seja, a adição de água reduz ainda mais a pouca saturação existente, tornando os caroços de algodão visualmente mais neutros (perto do cinza absoluto).

Ramashia et al. (2018) descrevem que os valores do ângulo hue (ou matiz) variam de 0° (vermelho), 90° amarelo, 180° verde e 270° (azul), sendo que o ângulo (h°) distingue uma cor específica de uma cor cinza de mesma luminância, classificando cores como avermelhadas ou esverdeadas. A saturação ou croma, é uma medida quantitativa de cor usada para avaliar o quão diferente a matiz é de uma cor cinza, com a mesma luminância. Valores mais altos de croma indicam maior intensidade da cor percebida. Portanto, a percepção da cor está intimamente ligada às variações na absorbância em diferentes comprimentos de onda, com o croma e o ângulo de matiz juntos determinando a intensidade e a classificação da cor (Pathare et al., 2013). Dharshini e Meera (2023), ao analisarem sementes de amarantho, encontraram ângulo hue entre 61° e 68° e saturação entre 4 e 11, que representam tendência ao amarelo pouco vibrante, características que puderam ser perceptíveis a olho nu.

4.4 Propriedades aerodinâmicas

A análise de regressão demonstrou que o modelo linear crescente se ajustou satisfatoriamente aos dados experimentais de velocidade terminal (V_t), apresentando coeficientes de determinação (R^2) de 0,9762 para os caroços com linter e 0,9324 para os

deslintados (Figura 11). Observou-se uma correlação positiva entre a velocidade terminal e o teor de água, indicando que a velocidade do fluxo de ar necessária para manter os caroços de algodão em suspensão aumenta proporcionalmente ao aumento de teor de água do produto.

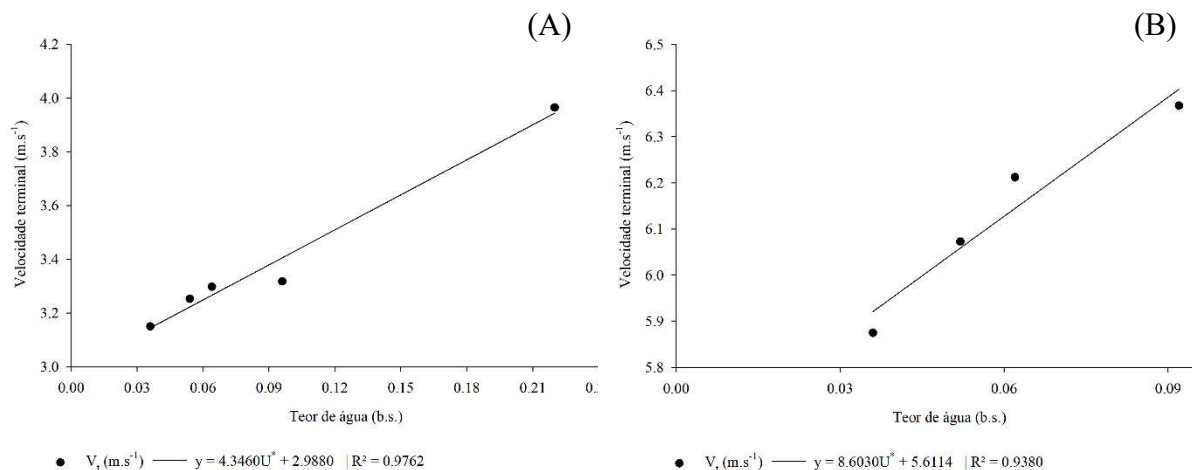


Figura 11. Velocidade terminal (V_t) para caroços de algodão com línter (A) e deslintados (B) em função do teor de água.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste “t”.

Fonte: A Autora (2026).

O aumento da velocidade necessária para a suspensão do produto com a elevação do teor de água é um fenômeno físico explicado pelo balanço de forças. A velocidade terminal é atingida quando a força de arrasto aerodinâmico se equipara à força peso da partícula. Com a absorção de água, o aumento de massa do produto (força peso) é proporcionalmente superior ao aumento da sua área projetada ou volume. Consequentemente, torna-se necessário um fluxo de ar com maior velocidade para romper a inércia das partículas mais pesadas e retirar os caroços de algodão do estado de repouso (Eze et al., 2022; Mohsenin, 1986).

Para os caroços de algodão deslintados, a velocidade terminal variou na faixa de 5,88 a 6,37 m.s^{-1} , quando o teor de água aumentou de 0,036 a 0,092 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.). Enquanto os caroços de algodão com línter apresentaram velocidade terminal média de 3,15 e 3,97 m.s^{-1} para os teores de água de 0,036 a 0,220 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.). A diferença entre as médias de velocidade terminal observada para os dois produtos pode ser explicada devido a presença do línter, que aumenta a superfície de contato entre o produto e o ar permitindo a suspensão desse com velocidades muito menores. Gharekhani et al. (2012), ao analisarem as propriedades aerodinâmicas para grãos de arroz com casca e arroz branco, também observaram que a velocidade terminal foi menor para todas as variedades de arroz em casca quando comparadas com as mesmas variedades de arroz branco.

Em termos práticos, em uma coluna de ar com velocidade ajustada para $5,0 \text{ m.s}^{-1}$, por exemplo, ocorreria a suspensão dos caroços de algodão com linter, enquanto o produto deslintado permaneceria em repouso. Sob a ótica da engenharia, estes resultados são fundamentais para o dimensionamento de sistemas em que ventiladores para caroços deslintados devem ser projetados para operar com velocidades superiores a $6,5 \text{ m.s}^{-1}$, enquanto para o produto com linter, velocidades em torno de $4,5 \text{ m.s}^{-1}$ são suficientes, impactando diretamente o consumo energético e a regulação de máquinas em função do teor de água do lote processado. Em contrapartida, em máquinas de pré-limpeza a velocidade do ar deve ser adequada para a separação de materiais mais leves, sendo assim, o fluxo de ar deve ser ajustado de forma que seja suficiente para remover impurezas e materiais estranhos, porém inferior à velocidade terminal dos caroços de algodão, para evitar que produtos viáveis sejam descartados.

A Figura 12 demonstra as regressões lineares ajustadas para o coeficiente de arrasto (C_d) e a força de arrasto (F_d) dos caroços de algodão com linter (A) e deslintados (B).

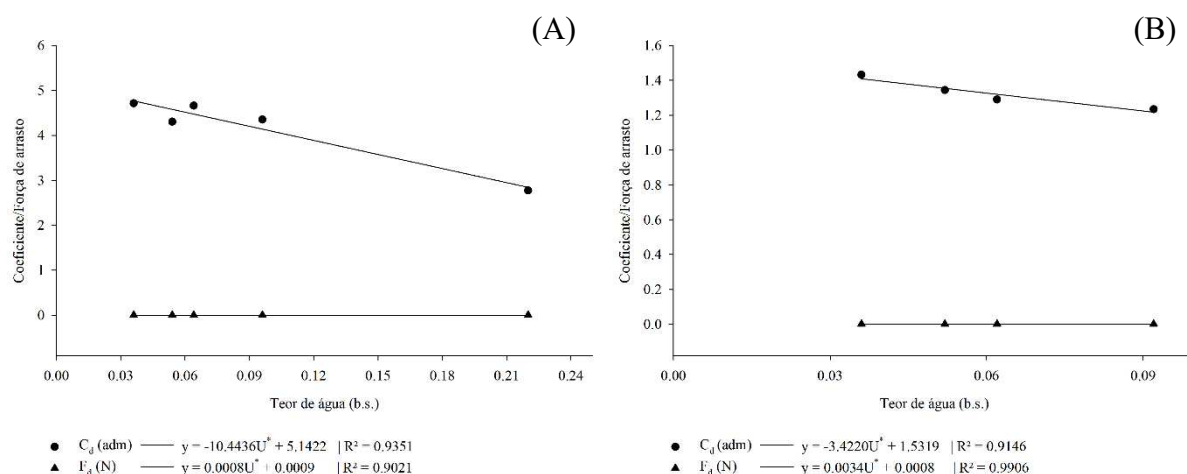


Figura 12. Coeficiente de arrasto (C_d) e força de arrasto (F_d) para caroços de algodão com linter (A) e deslintados (B).

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste “t”.

Fonte: A Autora (2026).

Para o coeficiente de arrasto, observou-se uma correlação linear negativa com o teor de água para ambos os produtos. Os caroços com linter apresentaram valores variando de 4,71 a 2,77, enquanto os caroços deslintados exibiram médias entre 1,40 e 1,20. Maiores médias de C_d para o produto com linter confirmam a influência do linter na diferença entre os materiais.

Por outro lado, a força de arrasto calculada (F_d) apresentou uma tendência linear positiva em função do teor de água para ambos os materiais. É fundamental ressaltar que, na condição

de velocidade terminal, o sistema encontra-se em equilíbrio dinâmico, onde a força de arrasto se equipara à força peso da partícula. Portanto, o aumento da força de arrasto observado é uma resposta direta ao aumento da massa do produto provocado pela absorção de água. Comparativamente, os caroços deslintados demandaram forças de arrasto superiores em relação aos caroços com linter. Entender essa diferença é fundamental para o projeto de sistemas de transporte, indicando que o produto com linter, embora flutue mais facilmente, impõe maior resistência ou perda de carga por atrito em tubulações de transporte pneumático.

Os resultados obtidos para o Número de Reynolds (Re) dos caroços de algodão com linter e deslintados, em função do teor de água, estão apresentados na Figura 13.

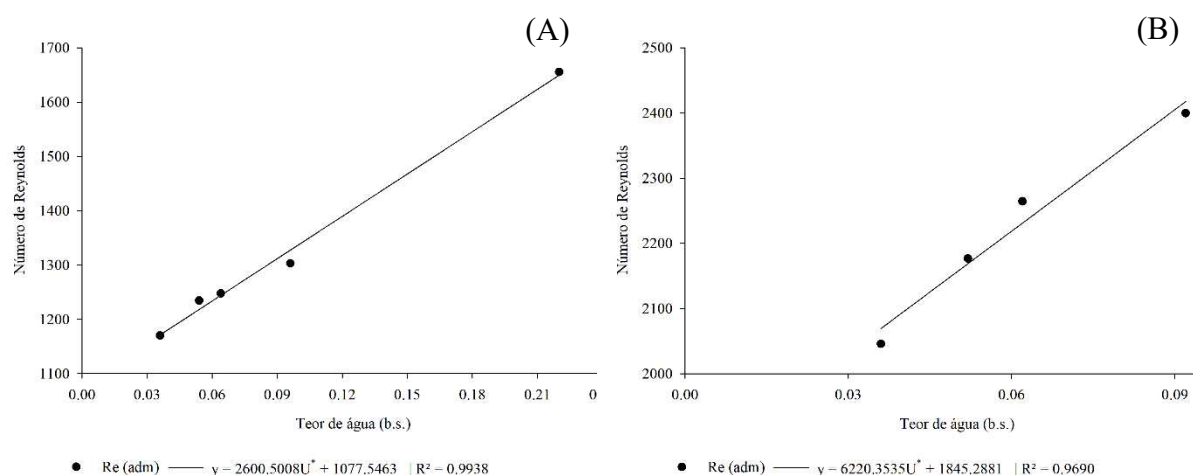


Figura 13. Número de Reynolds (Re) para caroços de algodão com linter (A) e deslintados (B).

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste “t”.

Fonte: A Autora (2026).

Observou-se que o Número de Reynolds aumentou linearmente com o aumento do teor de água para ambos os produtos. Os valores de Re para os caroços deslintados aumentaram de 2045,62 para 2399,73 quando o teor de água passou de 0,036 para 0,092 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.), enquanto para os caroços com linter variaram de 1169,95 para 1655,51 na faixa de teor de água entre 0,036 e 0,220 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.), respectivamente. O aumento do teor de água promoveu maior massa do produto, exigindo, portanto, maior força aerodinâmica (arrasto) para sustentá-los em suspensão. Esse fenômeno físico explica o aumento observado na velocidade terminal com a elevação do teor de água. Matematicamente, o Número de Reynolds é diretamente proporcional à velocidade terminal (V_t) e à dimensão característica da partícula (D_g). Como demonstrado nas seções anteriores, tanto a velocidade terminal quanto o diâmetro geométrico dos caroços de algodão aumentaram com o incremento do teor de água. Portanto, o

comportamento ascendente do Número de Reynolds observado para ambas as condições de beneficiamento é fisicamente consistente, refletindo as alterações morfológicas e aerodinâmicas sofridas pelo produto com o aumento do teor de água (Eze et al., 2022). O aumento do Re evidencia que o escoamento do ar ao redor da partícula passa a ser mais influenciado pelas forças inerciais, demonstrando que o aumento no tamanho e na velocidade terminal exige maior energia para a fluidização ou transporte do produto em maiores teores de água

5 CONCLUSÕES

A análise experimental das propriedades geométricas, gravimétricas, colorimétricas e aerodinâmicas dos caroços de algodão com línter e deslintados, revelou que o teor de água atua como um fator determinante na alteração do comportamento destes produtos.

O aumento do teor de água promoveu a expansão linear das dimensões características em ambos os materiais, resultando na redução dos índices de esfericidade e circularidade. Contudo, o processo de deslintamento evidenciou uma clara distinção na expansão volumétrica: enquanto os caroços de algodão deslintados expandiram-se predominantemente no eixo longitudinal, os caroços de algodão com línter apresentaram maior alteração na largura e comprimento. Os caroços de algodão, independentemente do beneficiamento, foram caracterizados como partículas não esféricas e não circulares, tendendo ao formato oblongo com o aumento do teor de água.

Acerca das propriedades gravimétricas, a presença do línter inverteu a tendência de comportamento da massa específica aparente e da porosidade. Para os caroços deslintados, o aumento do teor de água resultou na redução da massa específica aparente e no aumento da porosidade, comportamento típico da maioria dos grãos agrícolas. Em contrapartida, para os caroços de algodão com línter, o aumento do teor de água elevou a massa específica aparente e reduziu a porosidade do leite. Esse fenômeno indica que a alta capacidade de retenção de água das fibras e o aumento da coesão superficial superam o efeito volumétrico da expansão. A massa de mil grãos aumentou linearmente com o teor de água. A presença do línter conferiu maior sensibilidade ao ganho de água, atuando como um elemento que elevou a massa desses a uma taxa superior à observada nos caroços deslintados.

Em relação às propriedades de cor, a análise colorimétrica demonstrou que o teor de água influencia diretamente as características visuais do produto. O aumento no teor de água reduziu a luminosidade de ambos os materiais, provocando o escurecimento do tegumento em ambos os grupos avaliados.

No âmbito aerodinâmico, conclui-se que a velocidade terminal apresenta uma correlação linear positiva com o teor de água, exigindo maior intensidade do fluxo de ar para a sustentação à medida que se eleva o teor de água. A diferença observada entre os tratamentos evidenciou que os caroços deslintados demandaram velocidades de fluxo significativamente superiores às requeridas pelos caroços com línter.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFZAL, Irfan et al. Harvesting and post-harvest management approaches for preserving cottonseed quality. **Industrial Crops and Products**, v. 155, p. 112842, 2020. [doi: 0.1016/j.indcrop.2020.112842].

ANANDAKUMAR, T. M. et al. Physical properties of Ashwagandha seeds (*Withania somnifera* L.) – A medicinal crop. **Industrial Crops and Products**, v. 186, p. 115233, 2022. [doi: 10.1016/j.indcrop.2022.115233].

ANJALI, Panthavur Nairveetil et al. Physical Properties of Cereal Grains. In: **Cereal Grains**. 1st Edition, p. 25-47. CRC Press, Boca Raton, 2023. [doi: 10.1201/9781003252023].

ARAUJO, Marcos Eduardo Viana et al. Physical properties of yellow passion fruit seeds (*Passiflora edulis*) during the drying process. **Scientia Horticulturae**, v. 261, p. 109032, 2020. [doi: 10.1016/j.scienta.2019.109032].

BAJPAI, Ayushi et al. Effect of moisture content on the engineering properties of Jamun (*Syzgium cuminii*) seed. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 2, p. e13325, 2020. [doi: 10.1111/jfpe.13325].

BENESTANTE, Agustín et al. Physical and mechanical properties of lemon (*Citrus lemon*) seeds. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 22, n. 4, p. 205-213, 2023. [doi: 10.1016/j.jssas.2022.11.002].

BOCCACCINI, Alessandra et al. When size matters: New insights on how seed size can contribute to the early stages of Plant Development. **Plants**, v. 13, n. 13, p. 1793, 2024. [doi: 10.3390/plants13131793].

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

BRIDGES, Catelyn; HARDIN, Robert; MCCLURKIN-MOORE, Janie. Changes in cottonseed meal quality during post-harvest processing of cottonseed. **Journal of Stored Products Research**, v. 108, p. 102371, 2024. [doi: 10.1016/j.jspr.2024.102371].

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W; HALL, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds. **Springer**, New York, USA, 1992.

CARVALHO, Gisandro Reis et al. Physical properties of barley grains at hydration and drying conditions of malt production. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 4, p. e13644, 2021. [doi: 10.1111/jfpe.13644].

CERVANTES, Emilio et al. Seed silhouettes as geometric objects: new applications of elliptic Fourier transform to seed morphology. **Horticulturae**, v. 8, n. 10, p. 974, 2022. [doi: 10.3390/horticulturae8100974].

COSTA, Corrado et al. Shape analysis of agricultural products: a review of recent research advances and potential application to computer vision. **Food and Bioprocess Technology**, v. 4, n. 5, p. 673-692, 2011. [doi: 10.1007/s11947-011-0556-0].

CHENG, H. N. et al. A review of cottonseed protein chemistry and non-food applications. **Sustainable Chemistry**, v. 1, n. 3, p. 256-274, 2020. [doi: 10.3390/suschem1030017].

DAK, Manish; JAAFFREY, S. N. A.; GUPTA, R. B. Moisture-dependent physical properties of dried pomegranate arils. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 8, n. 3, p. 234-240, 2014. [doi: 10.1007/s11694-014-9190-7].

DARFOUR, Bernard et al. Physical characteristics of maize grain as influenced by varietal and moisture differences. **International Journal of Food Properties**, v. 25, n. 1, p. 1351-1364, 2022. [doi: 10.1080/10942912.2022.2077756].

DHARSHINI, S. Sai; MEERA, M. Effect of popping and milling on physical, chemical, structural, thermal properties and angle of repose of amaranth seed (*Amaranthus cruentus* L.)

and finger millet (*Eleusine coracana* L. Gaertn) from Udhagamandalam. **Applied Food Research**, v. 3, n. 2, p. 100306, 2023. [doi: 10.1016/j.afres.2023.100306].

EZE, Paul Chukwuka; EZE, Chikaodili Nkechi; IDE, Patrick Ejike. Effect of Moisture Content and Variety on the Some Physical and Aerodynamic Properties of Sesame Seeds Relevant to Its Processing. **ARRUS Journal of Engineering and Technology**, v. 2, n. 2, p. 78-91, 2022. [doi: <https://doi.org/10.35877/jetech678>].

GADI, Vinay Kumar et al. Understanding soil surface water content using light reflection theory: A novel color analysis technique considering variability in light intensity. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 48, n. 5, p. 4053-4066, 2020. [doi: 10.1520/JTE20180320].

GIERZ, Łukasz et al. The use of image analysis to study the effect of moisture content on the physical properties of grains. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 11673, 2024. [doi: 10.1038/s41598-024-60852-7].

GOJIYA, D. K. et al. Studies on physical properties of peanut Seed. **Acta Sci. Agric**, v. 4, n. 3, p. 1-5, 2020. [doi: 10.31080/ASAG.2020.04.0814].

GOJIYA, D. K. et al. Quantification of design associated engineering properties of sesame (*Sesamum indicum* L.) seed varieties as a function of moisture content. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 100, n. 8, p. 663-678, 2023. [doi: 10.1002/aocs.12691].

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; MAGALHÃES, F. E. A.; BAPTESTINI, F. M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 1-8, 16 fev. 2011 [doi: 10.4025/actasciagron.v33i1.4629].

GÜRSOY, S.; GÜZEL, Emin. Determination of physical properties of some agricultural grains. **Research journal of applied sciences, engineering and technology**, v. 2, n. 5, p. 492-498, 2010.

GHAREKHANI, M. et al. Physical and aerodynamic properties of paddy and white rice as a function of moisture content. **Quality assurance and safety of crops & foods**, v. 5, n. 3, p. 187-197, 2013. [doi: 10.3920/QAS2012.0129].

GRACE, John R.; EBNEYAMINI, Arian. Connecting particle sphericity and circularity. **Particuology**, v. 54, p. 1-4, 2021.

GRAFITI LLC. **SigmaPlot**. Versão 16.0. Palo Alto, CA: Grafiti LLC, 2024. Software.

GRIFT, T. E.; WALKER, J. T.; HOFSTEE, J. W. Aerodynamic properties of individual fertilizer particles. **Transactions of the ASAE**, v. 40, n. 1, p. 13-20, 1997. [doi: 10.13031/2013.21262].

HASHEMIFESHARAKI, Reza. Moisture-dependent engineering characterization of psyllium seeds: Physical, frictional, aerodynamic, mechanical, and thermal properties. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 45, n. 4, p. 374-384, 2020. [doi: 10.1007/s42853-020-00077-4].

HOLT, Greg et al. Development and evaluation of a novel bench-top mechanical cotton seed delinter for cotton breeders. **Journal of Cotton Science**, v. 21, n. 1, p. 18-28, 2017.

HUNT, Robert William Gainer. **The reproduction of colour**. John Wiley & Sons, 2005.

IGBOZULIKE, Augustine O.; AMAMGBO, Nnamdi. Effect of moisture content on physical properties of fluted pumpkin seeds. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 44, n. 2, p. 69-76, 2019. [doi: 0.1007/s42853-019-00015-z].

IKEGWU, Onyekachi John. Effect of moisture content on the physical properties of mung bean varieties grown in Abakaliki, Ebonyi State, Nigeria. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 25, n. 1, 2023.

JAIN, R. K.; BAL, S. Properties of pearl millet. **Journal of agricultural engineering research**, v. 66, n. 2, p. 85-91, 1997. [doi: 10.1006/jaer.1996.0119].

JOARDDER, Mohammad UH et al. **Porosity: establishing the relationship between drying parameters and dried food quality**. Springer, 2016. ISBN: 331923045X, 9783319230450.

KALINIEWICZ, Zdzisław; CHOSZCZ, Dariusz; LIPIŃSKI, Adam. Determination of seed volume based on selected seed dimensions. **Applied Sciences**, v. 12, n. 18, p. 9198, 2022. [doi: 10.3390/app12189198].

KAMRAN, Muhammad; AFZAL, Irfan. Production and processing of quality cotton seed. **Cotton Production and Uses: Agronomy, Crop Protection, and Postharvest Technologies**, p. 547-570, Springer, Singapore, 2020. [doi: 10.1007/978-981-15-1472-2_27].

KAYS, Stanley J. Preharvest factors affecting appearance. **Postharvest biology and technology**, v. 15, n. 3, p. 233-247, 1999. [doi: 10.1016/S0925-5214(98)00088-X].

KEBEDE, Michael; BALCHA, Merdasa. Cottonseed Production Technology. In: **Cotton Sector Development in Ethiopia: Challenges and Opportunities**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. p. 351-377. [doi: 10.1007/978-981-99-9149-5_14].

KUMAR, Manoj et al. Cottonseed oil: extraction, characterization, health benefits, safety profile, and application. **Food Analytical Methods**, v. 16, n. 2, p. 266-280, 2023. [doi: 10.1007/s12161-022-02410-3].

KUMAR, Vivek; SHARMA, Harish Kumar; KUMAR, Navneet. Engineering Properties of Foods. In: **Agro-Processing and Food Engineering: Operational and Application Aspects**. Singapore: Springer Singapore, 2022. p.23-80. [doi: 10.1007/978-981-16-7289-7_2].

KHIR, Ragab et al. Moisture-dependent color characteristics of walnuts. **International Journal of Food Properties**, v. 17, n. 4, p. 877-890, 2014. [10.1080/10942912.2012.675610].

LEON, Katherine et al. Color measurement in L* a* b* units from RGB digital images. **Food research international**, v. 39, n. 10, p. 1084-1091, 2006. [doi: 10.1016/j.foodres.2006.03.006].

LI, Hao et al. A novel method for seed cotton color measurement based on machine vision technology. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 215, p. 108381, 2023. [doi: 10.1016/j.compag.2023.108381].

LIU, Hai-Feng et al. Flavonoid biosynthesis controls fiber color in naturally colored cotton. **PeerJ**, v. 6, p. e4537, 2018. [doi: 10.7717/peerj.4537].

MANIMEHALAI, N.; VISWANATHAN, R. Physical properties of fuzzy cottonseeds. **Biosystems Engineering**, v. 95, n. 2, p. 207-217, 2006. [doi: 10.1016/j.biosystemseng.2006.06.008].

MARATHE, M. N.; JAYBHAYE, R. V.; MORE, P. G. Aerodynamic properties of sesame (cv. N-8) as affected by moisture content of seed. **Food Science Research Journal**, n. 8, n. 1, p. 105-111 ref. 25, 2017. [doi: 10.15740/HAS/FSRJ/8.1/105-111].

MEERA, K.; SMITA, M.; HARIPRIYA, S. Varietal distinctness in physical and engineering properties of paddy and brown rice from southern India. **Journal of food science and technology**. Ed. 56, no. 3, p.1473-1483, 2019. [doi: 10.1007/s13197-019-03631-x].

MELÉNDEZ-MARTÍNEZ, Antonio Jesús; VICARIO, Isabel M.; HEREDIA, Francisco J. Instrumental measurement of orange juice colour: a review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 85, n. 6, p. 894-901, 2005. [doi: 10.1002/jsfa.2115].

MIR, S. A.; BOSCO, S. J. D.; SUNOOJ, K. V. Evaluation of physical properties of rice cultivars grown in the temperate region of India. **International Food Research Journal**, v. 20, n. 4, p. 1521–1527, 2013.

MOHSENIN, N. N. Physical Properties of Plants and Animal Materials. **Gordon and Breach Science Publishers**, 1986. New York, 1986.

MOKBUL, Mansura; CHEOW, Yuen Lin; SIOW, Lee Fong. Physical properties, sensory profile and storage stability of compound chocolates made with cocoa butter replacer consisting of mango kernel fat and rice bran oil. **Food Chemistry Advances**, v. 3, p. 100515, 2023. [doi: 10.1016/j.focha.2023.100515].

MULLENIX, M. K. et al. Invited Review: Using whole cottonseed and cotton harvest residue in southeastern US beef cattle diets: Quality, intake, and changes in feed

characteristics. **Applied Animal Science**, v. 38, n. 5, p. 447-455, 2022. [doi: 10.15232/aas.2022-02301].

MUNIR, Hassan et al. Diverse uses of cotton: From products to byproducts. Cotton Production and Uses. In: **Agronomy, Crop Protection, and Postharvest Technologies**, p. 629-641, 2020. [doi: 10.1007/978-981-15-1472-2_30].

NEGM, Mohamed; SANAD, Suzan. Cotton fibres, picking, ginning, spinning and weaving. In: **Handbook of Natural Fibres**. Woodhead Publishing, 2020. p. 3-48. [doi: 10.1016/B978-0-12-818782-1.00001-8].

NICKERSON, Dorothy; HUNTER, Richard S.; POWELL, Marshall G. New automatic colorimeter for cotton. **Journal of the Optical Society of America**, v. 40, n. 7, p. 446-449, 1950.

ONWE, David Nwabueze et al. Comparative analysis of moisture-dependent physical and mechanical properties of two varieties of African star apple (*Chrysophyllum albidum*) seeds relevant in engineering design. **Scientific African**, v. 8, p. e00303, 2020. [doi: 10.1016/j.sciaf.2020.e00303].

ÖZARSLAN, C. PH—postharvest technology: physical properties of cotton seed. **Biosystems engineering**, v. 83, n. 2, p. 169-174, 2002. [doi: 10.1006/bioe.2002.0105].

PANIGRAHI, Shubham Subrot; SINGH, Chandra B.; FIELKE, John. CFD modelling of physical velocity and anisotropic resistance components in a peaked stored grain with aeration ducting systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 179, p. 105820, 2020. [doi: 10.1016/j.compag.2020.105820].

PATHARE, Pankaj B.; OPARA, Umezuruike Linus; AL-SAID, Fahad Al-Julanda. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. **Food and bioprocess technology**, v. 6, p. 36-60, 2013. [doi: 10.1007/s11947-012-0867-9].

QUOC, Le Pham Tan et al. Comparative evaluation of the physical characteristics of three sesame (*Sesamum indicum* L.) varieties in Vietnam. **Food Science and Preservation**, v. 32, n. 5, p. 768-775, 2025. [doi: 10.11002/kjfp.2025.32.5.768].

RAMASHIA, S. E. et al. Some physical and functional properties of finger millet (*Eleusine coracana*) obtained in sub-Saharan Africa. **Food Research International**, v. 104, p. 110-118, 2018. [doi: 10.1016/j.foodres.2017.09.065].

RENNER, Olga et al. Systematic review of Gossypol/AT-101 in cancer clinical trials. **Pharmaceuticals**, v. 15, n. 2, p. 144, 2022. [doi: 10.3390/ph15020144].

RIAZ, Tahreem et al. Cottonseed oil: A review of extraction techniques, physicochemical, functional, and nutritional properties. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 63, n. 9, p. 1219-1237, 2023. [doi: 10.1080/10408398.2021.1963206].

RIBEIRO, V. S.; SOBRAL, M. C.; ALMEIDA, M. M.; SILVA, G. F. Propriedades físicas de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 4, n.1, p. 1-6, 2002.

SANGAMITHRA, A. et al. Moisture dependent physical properties of maize kernels. **International Food Research Journal**, v. 23, n. 1, p. 109, 2016.

SINGH, Sanjay Kumar; KAUTKAR, Sheshrao; PATIL, Amit. Impact of engineering properties of grass seeds in developing post-harvest operations and machineries. **Environment Conservation Journal**, v. 22, n. 3, p. 395-399, 2021. [doi: 10.36953/ECJ.2021.22345].

SIHAG, Manvesh Kumar; PATEL, Ami; KUMAR, Vikas. Cottonseed (*Gossypium hirsutum*). Oilseeds: **Health Attributes and Food Applications**, p. 73-92, 2021. [doi: 10.1007/978-981-15-4194-0_3].

SCHWEMBER, Andrés R.; BRADFORD, Kent J. Quantitative trait loci associated with longevity of lettuce seeds under conventional and controlled deterioration storage conditions. **Journal of experimental botany**, v. 61, n. 15, p. 4423-4436, 2010. [doi: 10.1093/jxb/erq248].

VINAYAKA, M. Veerangouda et al. Study on some engineering properties of cotton seeds in relation to the development of a tractor operated seed dibbler. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 9, n. 5, p. 1836-1839, 2020.

WU, Man et al. Genetics, breeding and genetic engineering to improve cottonseed oil and protein: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 864850, 2022. [doi: 10.3389/fpls.2022.864850].

WU, Di; SUN, Da-Wen. Colour measurements by computer vision for food quality control—A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 29, n. 1, p. 5-20, 2013. [doi: 10.1016/j.tifs.2012.08.004].

ZAREIFOROUGH, H. et al. Moisture dependent physical properties of paddy grains. **Journal of american science**, v. 7, n. 7, p. 175-182, 2011.

ZIA, M. A. et al. Physicochemical features, functional characteristics, and health benefits of cottonseed oil: a review. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, p. e243511, 2021. [doi: 10.1590/1519-6984.243511].

ZHENG, Yuanzhao et al. Compressive mechanical properties of cottonseed. **Frontiers in Materials**, v. 10, p. 1322301, 2023. [doi: 10.3389/fmats.2023.1322301].

CAPÍTULO 2

MODELAGEM MATEMÁTICA DAS ISOTERMAS DE SORÇÃO E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS PARA CAROÇOS DE ALGODÃO

RESUMO

O conhecimento das propriedades higroscópicas é fundamental para a otimização de processos de pós-colheita e para a manutenção da qualidade fisiológica dos produtos durante o armazenamento. Este estudo teve como objetivo avaliar o equilíbrio higroscópico e as propriedades termodinâmicas da sorção de água em caroços de algodão (*Gossypium hirsutum* L.), cultivar IMA 5801 B2RF, com línter e deslintados. As isotermas de adsorção e dessorção foram determinadas pelo método estático-gravimétrico, em temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C. Os dados experimentais foram ajustados por meio de modelos matemáticos, sendo a seleção baseada no coeficiente de determinação, erro médio relativo (MRE), desvio padrão da estimativa (SDE) e nos critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC). O modelo Sigma-Copace apresentou o melhor desempenho estatístico, descrevendo isotermas de sorção do Tipo III para ambos os produtos. Sob o aspecto termodinâmico, observou-se que o calor isostérico integral e a entropia diferencial diminuíram com o aumento do teor de água, indicando a predominância de sítios de alta energia em baixos teores de água. A presença do línter intensificou o fenômeno de histerese, atuando como uma barreira física ao processo de sorção. A relação linear positiva entre entalpia e entropia confirmou a validade da Teoria da Compensação Isocinética, com temperaturas isocinéticas superiores à média harmônica, evidenciando que o processo de sorção é controlado pela entalpia, independentemente da condição de beneficiamento.

Palavras-chave: Equilíbrio higroscópico, Atividade de água, Histerese, Sigma-Copace, Compensação entalpia-entropia.

1 INTRODUÇÃO

A importância dos caroços de algodão está associada principalmente ao seu elevado valor nutricional, caracterizado por altos teores de proteína e óleo, sendo uma das principais fontes energéticas na dieta de ruminantes e na produção de óleo comestível e industrial (Kumar et al., 2023; Tao et al., 2024). O aproveitamento desse potencial está condicionado à manutenção da qualidade físico-química do produto após a colheita. Sendo assim, o armazenamento exerce papel determinante, visto que os caroços de algodão, assim como outros materiais agrícolas higroscópicos, apresentam forte interação com o ambiente de armazenamento.

A água exerce um papel fundamental na qualidade dos produtos armazenados. O teor de água deve permanecer dentro de limites que impeçam a deterioração microbiológica e transformações químicas indesejáveis (Arslan-Tontul, 2021). Os caroços de algodão são produtos higroscópicos, portanto esses são capazes de realizar trocas de vapor de água com o meio, podendo adsorver ou dessorver água da atmosfera até atingir o equilíbrio com as condições ambientais. Essa propriedade, embora natural, representa um desafio tecnológico, pois variações no teor de água podem comprometer a integridade física, favorecer processos de deterioração, intensificar a atividade respiratória do produto e criar condições propícias para o desenvolvimento de insetos e microrganismos. Consequentemente, perdas quantitativas e qualitativas podem ocorrer, impactando a viabilidade econômica do empreendimento e a segurança alimentar relacionada à cadeia produtiva.

Nesse contexto, as isotermas de sorção descrevem matematicamente a relação entre o teor de água de equilíbrio e a umidade relativa do ar em uma determinada temperatura. Essa relação, permite prever o teor de água de equilíbrio dos caroços em diferentes condições de armazenamento, fornecendo subsídios para a definição de limites críticos de teor de água e temperatura, bem como para o desenvolvimento de estratégias nas operações de pós-colheita (Hay et al., 2022).

Diversos modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos têm sido desenvolvidos para descrever os processos de dessorção e adsorção de água em produtos agrícolas. Entretanto, nenhuma equação é universalmente aplicável a todos tipos de produto, uma vez que o processo de sorção depende de características físico-químicas de cada produto (Collazos-Escobar et al., 2022). Além disso, as isotermas de sorção ainda permitem determinar as propriedades termodinâmicas relacionadas a esse processo, sendo usadas para o cálculo do calor isostérico de sorção, entropia de sorção, calor latente e energia livre de Gibbs, os quais fornecem

informações sobre a interação das moléculas de água com os constituintes do produto, requisitos de energia durante a secagem e estado molecular da água contida em sua composição (Collazos-Escobar et al., 2022; Silva et al., 2021; Arslan-Tontul, 2020; Zhang et al., 2022).

De acordo com Oliveira et al. (2013), o uso da modelagem matemática para prever as isotermas de sorção apresenta como vantagem a construção de isotermas com base em um número reduzido de pontos experimentais. Esse método permite obter dados em ampla faixa de atividade de água, abrangendo regiões tanto de baixa como de alta atividade, facilitando assim a determinação do teor de equilíbrio para diversas condições de armazenamento de produtos agrícolas, dentre eles, caroços de algodão com línter e deslntado.

O estudo das isotermas de sorção dos caroços de algodão também se insere em um contexto mais amplo de inovação e sustentabilidade na cadeia agrícola. Ao fornecer dados experimentais confiáveis e validar modelos matemáticos capazes de descrever o fenômeno da sorção, este trabalho contribui para o desenvolvimento de tecnologias de pós-colheita mais eficientes, o que, por sua vez, impacta positivamente a competitividade de mercado, a redução de desperdícios e agregação de valor à cadeia produtiva do algodão.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo determinar as isotermas de sorção dos caroços de algodão sob diferentes condições de temperatura e umidade relativa do ar, bem como analisar as propriedades termodinâmicas de sorção dos caroços com línter e deslntados. Parte-se da hipótese de que a presença do línter influencia o comportamento higroscópico dos caroços, alterando as isotermas de sorção e os parâmetros termodinâmicos associados, além de modificar a resposta do material às variações de temperatura e umidade relativa. A pesquisa busca ainda avaliar a aplicabilidade de modelos matemáticos como ferramenta preditiva, de modo a subsidiar práticas de armazenamento, conservação e processamento dos caroços de algodão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Higroscopicidade dos produtos agrícolas

A água é um dos componentes mais importantes nos produtos agrícolas e desempenha papel crucial nos processos de armazenamento e processamento desses. Seus efeitos nos materiais biológicos vão muito além de seu aspecto quantitativo, afetando significativamente as reações químicas e a qualidade final dos produtos, o que a torna o fator mais importante em comparação com qualquer outro elemento (Hssaini et al., 2022).

O teor de água em caroços de algodão deve ser cuidadosamente monitorado não só durante o armazenamento, como também no processo de deslintamento químico. É um fator crítico, já que a água reage exotermicamente com o ácido, reduzindo a termotolerância das sementes podendo ocasionar danos a elas. Portanto, é essencial manter baixos níveis de teor de água em níveis aceitáveis durante esse procedimento para garantir a eficiência do deslintamento e a qualidade das sementes (Afzal et al., 2020).

Os materiais podem ser classificados com base em suas características de ligação com a água, podendo ser higroscópicos ou não higroscópicos. Um material não higroscópico não contém água ligada à sua estrutura e a pressão parcial da água no material é igual à pressão de vapor da água livre, enquanto em materiais higroscópicos, contém água ligada à sua estrutura, apresentando uma pressão de vapor inferior à da água livre (Srikiatden; Roberts, 2007).

Em geral, os produtos agrícolas são higroscópicos, característica que afeta o seu transporte, armazenamento, manuseio e consumo. Isso significa que, ao serem expostos ao vapor de água sob uma pressão específica, ocorre a sorção do vapor de água pelo material. Produtos agrícolas, como o caroço de algodão, quando submetidos a umidade relativa e temperatura constantes, estabelecem uma determinada pressão de vapor e tendem a atingir um equilíbrio com a temperatura e pressão de vapor do meio circundante (Aviara, 2020). Para alcançar o equilíbrio, o material pode ganhar ou perder água para o ambiente, dependendo se a pressão de vapor do meio é maior ou menor que a do produto. O processo de perda de água do produto para o ambiente é denominado dessorção, enquanto o processo inverso, ou seja, o ganho de água pelo produto é chamado de adsorção. Se as condições do ambiente permanecerem constantes, o produto tenderá a atingir o equilíbrio higroscópico com o meio que o circunda (Iji et al., 2025).

A água que não está quimicamente ligada a outras substâncias é denominada água livre e pode ser mensurada através da atividade de água. A atividade de água (a_w) é um outro termo

utilizado para descrever a umidade relativa (UR), em unidades decimais, sendo definida como $a_w = UR/100$, quando atinge o equilíbrio. Esta propriedade intrínseca dos materiais é baseada no conceito de termodinâmica e se refere à disponibilidade de água dos produtos biológicos para as mudanças físicas, químicas e biológicas (Aviara, 2020; Syamaladevi et al., 2016).

Conhecer a atividade de água dos materiais é crucial na prevenção e limitação do crescimento microbiológico em grãos e sementes, sendo um dos principais parâmetros para garantir a estabilidade dos produtos. A atividade de água modula a resposta microbiana e determina os tipos de microrganismos presentes (Tapia et al., 2020). Ela pode ser definida como a razão entre a pressão de vapor de água em um sistema (P_v) e a pressão de vapor da água de saturação (P_{vs}) na temperatura do sistema, expressa em pascal (Pa), conforme a Equação 01.

$$a_w = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (01)$$

A atividade de água varia de 0 a 1, sendo 1 correspondente à água pura, na qual o crescimento microbiano não é possível. À medida que os nutrientes e outros componentes são adicionados, os valores de a_w diminuem gradualmente, afetando a disponibilidade de água para os microrganismos (Barbosa-Cánovas et al., 2020; Tapia et al., 2020). De acordo com Jin et al., (2018), um alimento com baixo a_w contém valores menores que 0,83. Entretanto estudos mostram que organismos como a salmonela podem sobreviver em ambientes com atividade de água superior a esse valor. Bactérias podem se desenvolver em ambientes com a_w acima de 0,85, enquanto os fungos prosperam em valores a partir de 0,65 (Figura 1) (Tapia et al., 2020; Beuchat, 1983).

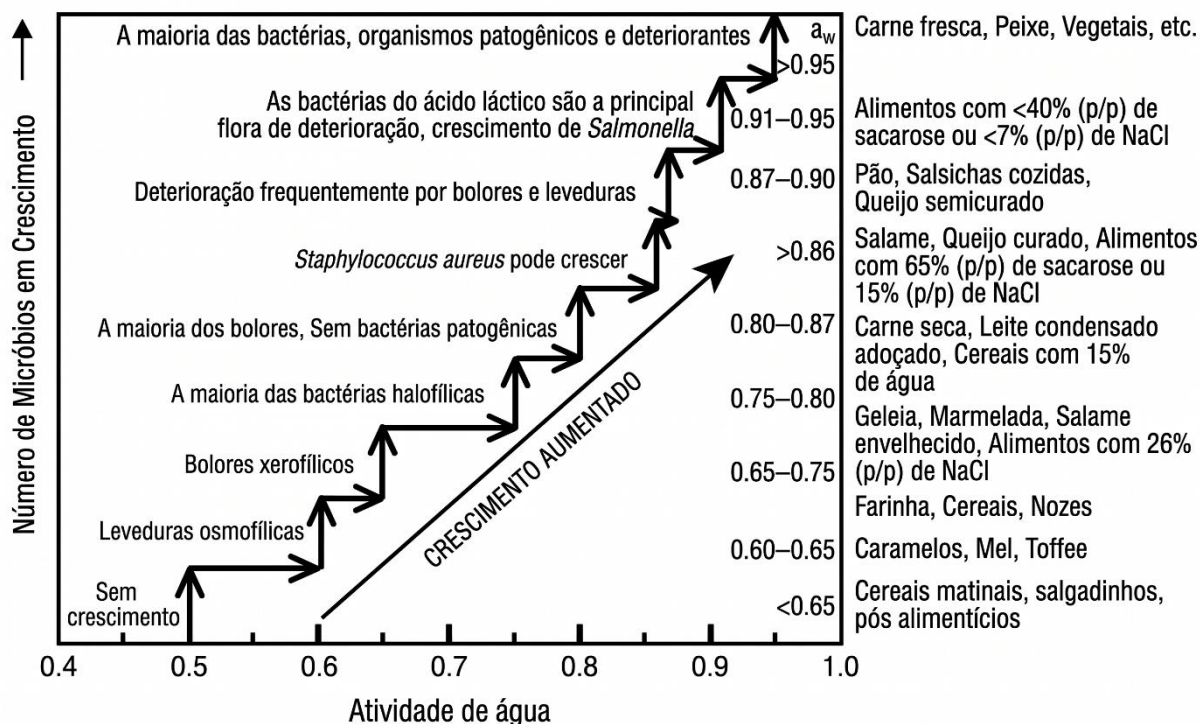


Figura 1. Limites de atividade de água para o desenvolvimento microbiano e exemplos de produtos correspondentes a cada faixa.

Fonte: Barbosa-Cánovas et al., (2020), tradução própria.

2.1.1. Isotermas de sorção

As isotermas de sorção correspondem a representação gráfica da relação termodinâmica entre a atividade de água (a_w) e o teor de água de equilíbrio (U_e), em condições específicas de temperatura e pressão. As isotermas de sorção podem representar propriedades de adsorção (ganho de teor de água) e dessorção (perda de teor de água). Quando os processos de adsorção e dessorção se tornam constantes, considera-se que o produto chegou no teor de água de equilíbrio. As isotermas de sorção são usadas para compreender os feitos da secagem, processamento, armazenamento e qualidade de produtos, assim como métodos e materiais de embalagens (Hay et al., 2022; Chen, 2019).

As isotermas de sorção de água são classificadas com base em suas formas distintas, que refletem as propriedades cinéticas e termodinâmicas das moléculas de água nos materiais. Essas curvas caracterizam a interação entre a água e o material, indicando como a água é adsorvida ou dessorvida a diferentes níveis de atividade de água sob condições de temperatura constante. Os processos de sorção não são completamente reversíveis. Quando os processos de adsorção e dessorção em uma mesma temperatura resultam em diferentes teores de água de

equilíbrio, ocorre uma defasagem entre as isotermas, sendo conhecido pelo processo de histerese. Esse fenômeno indica a ocorrência de mudanças estruturais nos materiais, que alteram a interação com a água. Tais mudanças afetam o acesso aos sítios polares e dificultam a movimentação da água nos produtos durante os processos de sorção (Marques et al., 2020; Peleg, 2019).

Em produtos agrícolas, as isotermas de sorção geralmente apresentam um formato sigmoide não linear, variando conforme a composição química e características físicas dos produtos. Brunauer et al. (1945) classificam as isotermas em cinco tipos gerais (Figura 2), baseando-se na maneira como os gases não polares são adsorvidos em substratos sólidos e não porosos por meio das forças de Van der Waals (Labuza; Altunakar, 2020).

As isotermas do tipo I são características de agentes antiaglomerantes devido à sua capacidade de reter grandes quantidades de água em baixas atividades de água. Essas isotermas são convexas para cima e apresentam uma região plana horizontal que se mantém em pressões de gás elevadas, indicando que há pouco aumento no teor de água com o aumento da umidade, podendo ser descritas pela equação de Langmuir. A isoterma tipo II, comumente encontrada em produtos solúveis, possui formato característico do tipo sigmoide, apresentando duas regiões de inflexão: uma entre a_w de 0,2 e 0,4 e outra entre 0,6 e 0,7, que refletem as mudanças físicas e químicas do processo de sorção. Isotermas tipo III, também conhecida como isoterma de Flory-Higgins, representam os sistemas constituídos principalmente por compostos cristalinos e que a interação adsorbato-adsorbato é maior quando comparada com a interação adsorbato-adsorvente. A isoterma do tipo IV descreve a adsorção por um sólido hidrofílico até atingir um máximo de hidratação, retrata o comportamento de materiais mesoporosos. A isoterma do tipo V é classificada como isoterma de BET com adsorção em multicamadas, indicando a presença de mesoporos em mudança de fase, apresentando um ponto de inflexão (Labuza; Altunakar, 2020; Al-Ghouti; Da'Ana, 2020).

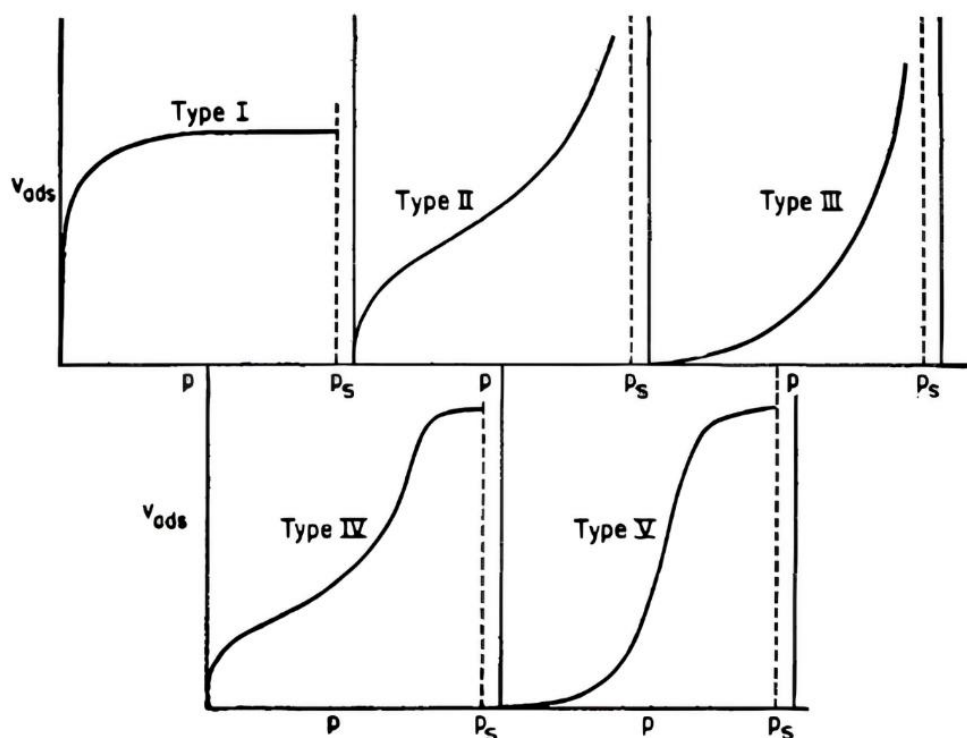


Figura 2. Cinco tipos de isothermas de sorção.

Fonte: Brunauer et al., 1945.

Existem muitos métodos disponíveis para a determinação de isothermas de sorção, que podem ser classificados em três principais categorias: (i) manométricos, (ii) higrométricos e (iii) gravimétricos. No método manométrico são utilizados manômetros sensíveis para medir a pressão de vapor da água de equilíbrio que envolve o produto. O sistema é mantido a temperatura constante e a amostra irá se equilibrar com o meio, que será indicado pela diferença de altura no manômetro (Aviara, 2020; Basu et al., 2006). Para o método higrométrico as amostras em determinado teor de água e temperatura são colocadas em um recipiente fechado. A umidade relativa dos recipientes é medida quando o ambiente atinge o estado de equilíbrio. Nesse método, é necessária uma técnica de distribuição uniforme do teor de água das amostras e higrômetros precisos (Aviara, 2020; Al-Muhtaseb et al., 2002). O método gravimétrico consiste na medição das variações de massa que podem ser monitoradas em sistemas dinâmicos e estáticos (Aviara, 2020; Chen, 2019; Basu et al., 2006, Al-Muhtaseb et al., 2002). É um dos métodos mais aplicados na ciência de alimentos. Neste método, a amostra é submetida a ambientes com temperatura (T) e umidade relativa (UR) controladas, podendo ser classificado em dois tipos: (i) estático e (ii) dinâmico.

No método estático, o produto é inserido em um ambiente com atmosfera controlada, no qual atinge o equilíbrio sem movimentação do ar ou do produto. Nesse processo, as umidades relativas são mantidas por meio de soluções salinas saturadas ou diluições de ácido sulfúrico em diferentes concentrações, mantidas em recipientes herméticos. As amostras são colocadas nesse sistema com umidade relativa e temperaturas controladas em câmaras climáticas, até que atinja peso constante, alcançando o equilíbrio. É um processo mais lento, podendo levar semanas para atingir o equilíbrio higroscópico. Devido ao longo período de análise, é possível que ocorra o crescimento de microrganismos e aparecimento de mofo em produtos com alto teor de água ou com atividade de água acima de 0,8. Para garantir a confiabilidade dos dados, é essencial evitar o aparecimento desses organismos durante as análises (Aviara, 2020; Tejada-Ortigoza et al., 2020; Chen, 2019).

No método dinâmico, o ar ou o produto são movimentados mecanicamente em instrumentos que controlam a temperatura e umidade relativa do ambiente. Esses equipamentos monitoram continuamente as mudanças de massa das amostras e controlam gradualmente os fluxos de ar saturado de vapor de água e seco por meio de controladores de fluxo de massa, sem a necessidade de manuseio constante das amostras pelo pesquisador. Cada valor de umidade relativa e temperatura são mantidos até que a massa da amostra se estabilize dentro de uma tolerância pré-estabelecida antes de passar para os próximos valores. A movimentação mecânica permite obter resultados mais rapidamente e reduz o risco de crescimento de mofo durante o processo. Em contrapartida, apresenta como desvantagem o alto custo dos equipamentos (Chen, 2019; Schmidt; Lee, 2012).

Diversos modelos foram desenvolvidos para descrever os processos sorção de água em produtos agrícolas. O modelo selecionado e os parâmetros obtidos são específicos para cada produto, portanto nenhuma equação é universalmente aplicável a todos os materiais, pois podem resultar em diferenças significativas nos resultados de teor de água de equilíbrio (U_e). Os processos de dessorção e adsorção dependem das características específicas de cada material, sendo afetados pela composição física e química de cada espécie. Além disso, características como variedade, estágio de maturação, condições físicas e sanitárias devem ser levadas em conta para o estabelecimento da U_e de um produto (Zeymer et al., 2023; Collazoz-Escobar et al., 2022). O uso da modelagem matemática para prever as isotermas de sorção apresenta como principal vantagem a construção de isotermas com base em um número reduzido de pontos experimentais (Oliveira et al., 2013).

2.1.2 Histerese

A histerese nas isotermas de sorção é um fenômeno amplamente observado em produtos higroscópicos, especialmente em materiais agrícolas, caracterizado por trajetórias distintas entre os processos de adsorção e dessorção de água. Para uma mesma atividade de água e temperatura, o teor de água de equilíbrio obtido na dessorção é superior ao verificado na adsorção, evidenciando a não reversibilidade completa do processo. Embora, em muitos casos, sua magnitude seja relativamente pequena, a histerese possui implicações relevantes em operações de secagem, armazenamento e previsão da estabilidade de produtos agrícolas (Al-Muhtaseb, 2004; Kapsalis, 1981).

A ocorrência e a extensão da histerese estão associadas à natureza estrutural e ao estado físico-químico da matriz sólida. Devido à complexidade composicional dos produtos agrícolas, que apresentam múltiplos constituintes interagindo simultaneamente, o fenômeno de histerese não é totalmente compreendido e não há uma explicação única para o fenômeno (Mohamed et al., 2005; Iglesias; Chirife, 1976). De modo geral, a histerese é atribuída à interação entre características estruturais, composição química e condições termodinâmicas do sistema (Yan et al., 2008). Rearranjos conformacionais de proteínas, carboidratos e polissacarídeos durante os ciclos de adsorção e dessorção podem modificar a acessibilidade de sítios polares energeticamente favoráveis à ligação da água, alterando o comportamento higroscópico do material (Rizvi, 1995).

Do ponto de vista estrutural, a histerese está relacionada à natureza porosa dos grãos e materiais biológicos, constituídos por capilares interconectados de diferentes diâmetros. Durante a dessorção, os poros mais estreitos exercem maior controle sobre o esvaziamento capilar, favorecendo a retenção de água no interior da matriz devido a efeitos capilares e restrições geométricas. Poros com extremidades estreitas podem aprisionar umidade mesmo em baixas atividades de água. Já na adsorção, o preenchimento desses capilares não ocorre de maneira equivalente, impedindo que o material retorne ao teor de água previamente observado (Brooker et al., 1992; Zeymer et al., 2023). Em materiais de base biológica, a presença de regiões amorfas nanoporosas, especialmente associadas à celulose, favorece a retenção de água ligada e promove a expansão da matriz sólida, resultando em modificações microestruturais que contribuem para o laço de histerese (Zou et al., 2025).

Além dos efeitos capilares, transformações físico-químicas também desempenham papel relevante. A dissolução de solutos durante a adsorção pode alterar a atividade de água do sistema, enquanto o inchaço de macromoléculas e a formação ou reorganização de ligações de hidrogênio modificam a disponibilidade de sítios de sorção (Fredriksson; Thybring, 2018). Processos termodinamicamente irreversíveis, que podem ocorrer em uma ou em ambas as

etapas do ciclo de sorção, também são apontados como fatores determinantes do fenômeno (Guo et al., 2020).

A forma e a magnitude da histerese variam conforme a composição do produto. Em produtos ricos em açúcares e pectinas, o fenômeno tende a ser mais pronunciado em baixas atividades de água (Ghennam et al., 2009). Produtos com elevado teor proteico podem apresentar histerese ao longo de ampla faixa da isoterma, enquanto materiais predominantemente amiláceos frequentemente exibem laço acentuado, com desvio máximo na região de condensação capilar (Ghennam, Berkouk, 2010; Hssaini et al., 2022). Além da composição, a temperatura influencia significativamente a intensidade e o formato do laço de histerese, sendo comum a redução de sua magnitude com o aumento da temperatura (Al-Muhtaseb et al., 2002; Hssaini et al., 2022).

2.2 Propriedades termodinâmicas

A termodinâmica, ramo da biofísica que estuda as relações entre calor e outras formas de energia, desempenha um papel fundamental na compreensão dos fenômenos biológicos essenciais, como crescimento e respiração, que dependem de alterações energéticas (Tamilarasan et al., 2025). No contexto da engenharia de alimentos e pós-colheita, as propriedades termodinâmicas de sorção têm sido amplamente utilizadas para ilustrar o comportamento da água na matriz alimentar e calcular as demandas energéticas para transferência de calor e massa (Araújo; Pena, 2022; Rizvi; Benado, 1984). Segundo Ferreira Júnior et al. (2021), o conhecimento dessas propriedades é crucial para o projeto e dimensionamento de equipamentos de secagem e conservação. Tais propriedades, como entalpia, entropia e energia livre de Gibbs, descrevem fenômenos em nível intermolecular, ilustrando a intensidade da interação da água com os constituintes do produto, o arranjo espacial do sistema água-matéria seca e a afinidade do material pela água (Sormoli; Langrish, 2015; Jideani; Mpotokwana, 2009; Corrêa et al., 2010).

O calor isostérico integral de sorção representa a energia liberada ou absorvida pelo sistema sob pressão constante. Este parâmetro indica a intensidade das forças de ligação entre o sólido e a água, sendo primordial para a predição das necessidades energéticas durante a secagem e armazenamento (Santos et al., 2020; Goneli et al., 2016). Associado a isso, o calor latente de vaporização da água livre corresponde à quantidade de energia necessária para a mudança da fase líquida para gasosa de uma unidade de massa a uma determinada temperatura (Li, 2021; Van den Berg; Bruin, 1981). A magnitude do calor isostérico em relação ao calor

latente fornece uma medida da energia excedente necessária para remover a água ligada à matriz biológica. O estado em que a água se encontra no material constitui um importante indicador da estabilidade física, química e microbiológica de alimentos durante o armazenamento. Nesse contexto, o conhecimento do calor isostérico integral é fundamental para o dimensionamento de sistemas de secagem, pois permite estimar a quantidade de energia necessária para remover a água adsorvida acima do calor latente de vaporização da água pura, especialmente em materiais com baixo teor de água (Zeymer et al., 2025).

A entropia diferencial expressa o grau de desordem molecular do sistema e está diretamente associada a transformações físico-químicas como dissolução, cristalização e hidratação (Lago et al., 2013; Madamba et al., 1996). Sob a perspectiva termodinâmica, a entropia representa a fração de energia indisponível para a realização de trabalho útil. Em contraste, a energia livre de Gibbs (ΔG), definida pela diferença entre entalpia e entropia, corresponde à parcela de energia efetivamente disponível para a realização de trabalho, sendo um parâmetro determinante para avaliar a direção e a espontaneidade dos processos (Tamilarasan et al., 2025; Gozke, 2022). Essa função termodinâmica reflete a afinidade entre o produto e a água em que valores negativos ($\Delta G < 0$) indicam processos espontâneos, geralmente associados à sorção, enquanto valores positivos ($\Delta G > 0$) sugerem não espontaneidade (Telis-Romero et al., 2005; McMinin et al., 2005). As propriedades termodinâmicas da água, calculadas via isotermas de sorção, oferecem informações valiosas sobre os mecanismos de deterioração celular e a capacidade de armazenamento de grãos e sementes (Vertuci; Leopold, 1984; Leopold et al., 1994).

A teoria da compensação entalpia-entropia ou teoria isocinética, descreve uma relação linear entre a entalpia (ΔH) e a entropia (ΔS), parâmetros associados aos fenômenos físicos e químicos de sorção (Griessen; Dam, 2021; Alves et al., 2015). Enquanto a variação de entalpia reflete a interação molecular água-adsorvente, a mudança de entropia refere-se às forças de ligação ou repulsão e ao arranjo estrutural do sistema (Alves et al., 2015). A validade desta teoria deve ser confirmada pelo teste de Krug (Krug et al., 1976a; Krug et al., 1976b), que compara a temperatura isocinética (T_B) com a temperatura média harmônica (T_{hm}) do experimento. Conforme estabelecido, o mecanismo de sorção é considerado controlado pela entalpia se $T_B > T_{hm}$, e controlado pela entropia caso contrário, $T_B < T_{hm}$ (Alves et al., 2015).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida no laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação da Qualidade de Produtos, pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem e Assuntos Afins (CENTREINAR), vinculado ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

3.1 Preparo das amostras

O material experimental foi composto por caroços de algodão da cultivar IMA 5801 B2RF, provenientes de unidades armazenadoras localizadas no município de Correntina, no estado da Bahia. As avaliações foram realizadas considerando caroços de algodão com línter e caroços de algodão deslintados. O deslintamento foi realizado na unidade beneficiadora por meio de processo químico via úmida, empregando-se solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 8% (v/v), acrescida de 1% de agente antiespumante, diluída em água. Após o tratamento ácido, o material foi submetido à neutralização com carbonato de cálcio (CaCO_3), com o objetivo de cessar a ação química e promover a estabilização do produto.

Previamente às análises, os caroços foram submetidos a uma etapa de pré-limpeza com o objetivo de eliminar impurezas e materiais estranhos presentes na massa granular. Essa etapa consistiu em peneiramento manual, utilizando peneira metálica com perfurações oblongas ($10'' \times 3/4''$) e para o produto com línter, realizou-se ainda a retirada manual de impurezas que estavam aderidas ao línter.

O teor de água inicial foi determinado pelo método gravimétrico, conforme as Regras para Análise de Sementes (RAS). Para cada condição de beneficiamento, foram utilizadas quatro repetições de aproximadamente 5 g, acondicionadas em cápsulas metálicas e levadas à estufa de circulação forçada de ar, mantida a 105 ± 1 °C, por um período de 24 h (Brasil, 2009).

Com o intuito de obter caroços de algodão com línter em faixas mais elevadas de teor de água, a colheita foi realizada antes da abertura natural dos capulhos. Posteriormente, o descaroçamento e a remoção das fibras foram efetuados manualmente. O ajuste dos diferentes níveis de teor de água das amostras foi realizado em secador de bandejas (Graiman, modelo 6623), operando à temperatura de 50 °C. Destaca-se que, em razão das etapas térmicas e químicas envolvidas no processo de deslintamento, o teor de água máximo alcançado para os caroços deslintados foi de aproximadamente $0,092 \text{ kg}_{\text{água}}.\text{kg}^{-1}_{\text{matéria seca}}$, em base seca (b.s.).

3.2 Preparo das soluções salinas saturadas

As amostras foram submetidas a condições controladas de temperatura (T) e umidade relativa (UR). O controle da umidade relativa foi realizado pelo método estático, por meio do uso de soluções salinas saturadas em água destilada, preparadas conforme apresentado na Tabela 1. O preparo das soluções consistiu na dissolução e homogeneização dos sais em água destilada por um período de cinco minutos. Posteriormente, as soluções foram transferidas para dessecadores de vidro com vedação hermética. O controle da temperatura foi efetuado utilizando câmaras climáticas do tipo B.O.D. (Biochemical Oxygen Demand). Para garantir a estabilização das condições de UR e temperatura, os dessecadores foram mantidos nas câmaras B.O.D. à temperatura estabelecida por um período de 24 horas antes da inserção das amostras.

Tabela 1. Composição das soluções salinas saturadas.

Sal	Quantidade de Sal (g)	Quantidade de água (mL)
Cloreto de Lítio (LiCl)	150	85
Cloreto de cálcio (CaCl ₂)	200	80
Nitrato de cálcio (Ca(NO ₃) ₂)	200	80
Cloreto de sódio (NaCl)	200	60
Brometo de potássio (KBr)	200	80

Fonte: Jowitt; Wagstaffe, 1989 (Adaptado).

3.3 Teor de água de equilíbrio

Determinou-se o teor de água de equilíbrio pelo método estático gravimétrico. Foram empregadas 05 soluções salinas, as quais, submetidas a diferentes temperaturas (10, 20, 30, 40 e 50 ± 1°C), resultam em diferentes atividades de água, conforme indicado na Tabela 2. A atividade de água (a_w) é um outro termo utilizado para descrever a umidade relativa de equilíbrio (UR_e), em unidades decimais, sendo definida como $a_w = UR/100$.

Tabela 2. Valores de umidade relativa de equilíbrio (decimal) associados às soluções salinas saturadas nas temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C.

Soluções	Temperatura (°C)				
Salinas	10	20	30	40	50

LiCl	0,13	0,11	0,11	0,11	0,11
CaCl ₂	0,38	0,35	0,32	0,32	0,31
Ca(NO ₃) ₂	0,59	0,55	0,49	-	0,46
NaCl	0,79	0,78	0,76	0,75	0,75
KBr	0,81	0,84	-	-	-

Fonte: A autora

Após a estabilização das soluções, as amostras de caroços de algodão foram alocadas no interior dos dessecadores contendo as soluções salinas. Cada amostra continha cerca de 35 g $\pm$ 0,0500 de caroços de algodão contidos em embalagens de organza, em quatro repetições para cada tipo de amostra. Um aparelho termo-higrômetro (AKSO, modelo AK28 New) foi inserido junto às amostras para aferição periódica da temperatura e umidade relativa do sistema (Figura 3). O conjunto composto pelos dessecadores, soluções salinas, amostras e termo-higrômetro foi armazenado em câmaras climáticas nas temperaturas pré-determinadas para as umidades relativas desejadas (Zeymer et al., 2023).

Devido à presença de fungos (mofo) em amostras expostas a altas temperaturas e umidades relativas, tornou-se necessário implementar medidas de controle desses microrganismos. Para condições em que a umidade relativa excedeu 80%, foram borrifados 50 ml de solução de timol cristalino dissolvido em álcool etílico (C₂H₅OH, P.A. 95%) a uma concentração de 1%, por quilo de caroço de algodão (Cassini et al., 2006; Moreira et al., 2005).

Durante o experimento, as amostras foram pesadas em intervalos de 24 horas em uma balança analítica digital com precisão de 0,0001 g (Marte, modelo AY220). O equilíbrio higroscópico é alcançado quando a pressão de vapor de água do produto for igual à pressão de vapor de água do ar no ambiente controlado (interior do dessecador). Sendo assim, definiu-se como critério para alcançar o equilíbrio higroscópico quando a massa dos grãos apresentasse uma variação menor ou igual a 0,001g em três pesagens consecutivas (Zhang et al., 2022). Após atingir o equilíbrio higroscópico, as amostras eram encaminhadas para uma estufa de circulação de ar forçada a 105 °C por 24 h, a fim de determinar o teor de água de equilíbrio pelo método gravimétrico padrão (Brasil, 2009).

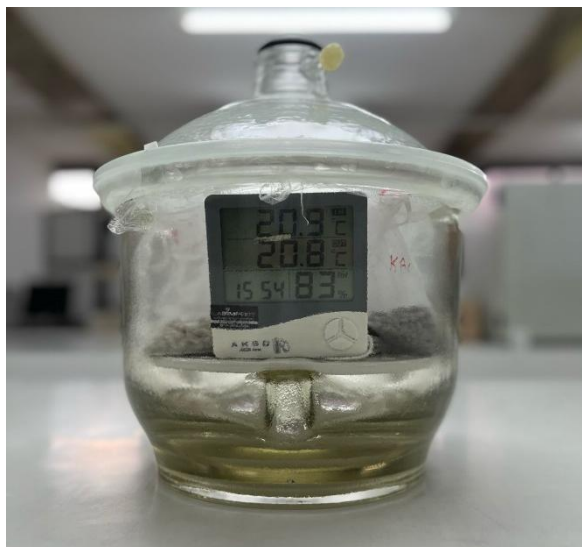


Figura 3. Sistema composto por dessecador, solução salina, amostras de caroços de algodão e termo-higrômetro para determinação de equilíbrio higroscópico.

Fonte: A autora.

3.3.1 Modelagem matemática das isotermas de sorção

Para a modelagem matemática do equilíbrio higroscópico, foram empregados quinze modelos matemáticos conforme indicado na Tabela 3. Esses modelos foram ajustados aos dados experimentais de teor de água para o caroço de algodão com línter e deslintados, obtidos pelos processos de dessorção e adsorção.

Tabela 3. Modelos matemáticos usados para a predição do equilíbrio higroscópico em caroços de algodão com línter e deslintados.

Modelo	Equação	Número da Equação
Cavalcanti Mata	$U_e = \left[\frac{\ln(1 - a_w)}{-aT^b} \right]^{1/c}$	(02)
Copace	$U_e = \exp [a - (bT) + (ca_w)]$	(03)
Copace II	$U_e = \exp \left[a + \left(\frac{b}{T} \right) + ca_w^3 \right]$	(04)
Copace III	$U_e = \frac{1}{a + b \log (a_w)}$	(05)
Chen Clayton	$U_e = \left(-\frac{1}{cT^b} \right) \ln \left[\frac{\ln (a_w)}{-aT^b} \right]$	(06)

Chung Pfost	$U_e = a - b \ln[-(T + c) \ln(a_w)]$	(07)
GAB Modificado	$U_e = \frac{ab \left(\frac{c}{T}\right) a_w}{\left\{ [1 - ba_w] \left[1 - ba_w + b \left(\frac{c}{T}\right) a_w \right] \right\}}$	(08)
Halsey modificado	$U_e = \left[\frac{\exp(a - bT)}{-\ln(a_w)} \right]^{1/c}$	(09)
Harkins-Jura	$U_e = \frac{\exp(a - bT)}{c - \ln(a_w)}$	(10)
Henderson Modificado	$U_e = \left[\frac{\ln(1 - a_w)}{-a(T + b)} \right]^{1/c}$	(11)
Oswin Modificado	$U_e = (a + bT) \left(\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right)^{1/c}$	(12)
Sabbah	$U_e = a \left(\frac{a_w^b}{T^c} \right)$	(13)
Sigma Copace	$U_e = \exp \{ a - (bT) + [c \exp(a_w)] \}$	(14)
Sigma Copace II	$U_e = \frac{1}{aT^b + a_w^c}$	(15)
Smith	$U_e = a - (bT) - c \ln(1 - a_w)$	(16)

Fonte: A autora.

Em que: U_e – teor de água de equilíbrio, $\text{kg}_{\text{de água}}.\text{kg}_{\text{de matéria seca}}^{-1}$, b.s.; a_w – atividade de água, decimal; T – temperatura, °C; a , b , c – parâmetros de ajuste dos modelos, adimensional.

3.4 Análise estatística

O ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais foi realizado por análise de regressão não linear, utilizando o método de estimativa de Gauss-Newton no *software* Statistica® 7.0 (Statsoft, 2004). A seleção do modelo de melhor representatividade para o teor de água de equilíbrio baseou-se na análise conjunta de três parâmetros estatísticos: (i) erro médio relativo (MRE), (ii) desvio padrão da estimativa (SDE) e (iii) coeficiente de determinação (R^2). Estes critérios foram calculados conforme as Equações 17, 18 e 19, respectivamente (Azad et al., 2023).

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{Y_i} \quad (17)$$

$$SDE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{GLR}} \quad (18)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (19)$$

Em que: n – número de dados observados; Y_i – valor experimental, $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$, b.s.; $\hat{Y}_i$ – valor estimado pelo modelo, $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$, b.s GLR – graus de liberdade do resíduo.

A avaliação do desempenho dos modelos foi complementada pela aplicação do Critério de Informação de Akaike (AIC) e do Critério de Informação Bayesiano (BIC). O AIC (Equação 20) fundamenta-se na função de verossimilhança e é indicado para a comparação de modelos concorrentes (não aninhados), penalizando a complexidade do modelo. O BIC (Equação 21), por sua vez, incorpora uma penalidade mais rigorosa associada ao tamanho da amostra, sendo particularmente útil para evitar o sobreajuste (*overfitting*). Para ambos os critérios, valores menores indicam um grau de ajuste superior aos dados experimentais (Zeymer et al., 2022; Ferreira Júnior et al., 2020; Corrêa et al., 2020).

$$AIC = -2\log L + 2p \quad (20)$$

$$BIC = -2\log L + p\ln(n - r) \quad (21)$$

Em que: p – número de parâmetros do modelo; n – número de dados observados; r – classificação da matriz X (matriz de incidência de efeitos fixos) e L – probabilidade máxima.

3.5 Análise do fenômeno de histerese

Uma vez selecionado o modelo matemático com melhor ajuste aos dados experimentais de teor de água de equilíbrio para os caroços de algodão com línter e deslntados, procedeu-se à análise da histerese. Analisou-se a diferença entre as curvas de adsorção e dessorção e o impacto da temperatura sobre esse fenômeno.

3.6 Propriedades termodinâmicas

Para a análise das propriedades termodinâmicas de sorção de água em caroços de algodão com linter e deslintados, utilizou-se os valores de teor de água de equilíbrio preditos pelo modelo matemático que melhor descreve o comportamento de sorção, determinado conforme indicado na seção anterior.

3.6.1. Calor isostérico integral

O calor isostérico integral representa o calor liberado ou absorvido por um sistema sob pressão constante e indica a intensidade da ligação entre o sólido e a água. Esse parâmetro é primordial para os processos de secagem e armazenamento de produtos agrícolas, ajudando na predição das necessidades energéticas durante a secagem e fornecendo informações cruciais para calcular o aquecimento e transferência de massa em sistemas biológicos (Santos et al., 2020; Goneli et al., 2016).

A partir do modelo matemático de melhor ajuste das isotermas de sorção e da reordenação da equação de Clausius-Clapeyron (Equação 22), foi possível calcular o calor isostérico líquido de sorção, também conhecido como entalpia (Van den Berg; Bruin, 1981).

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial T_a} = \frac{\Delta h_{st}}{RT_a^2} \quad (22)$$

Em que: a_w – atividade de água, decimal; T_a – temperatura absoluta, K; Δh_{st} – calor isostérico líquido de sorção, kJ.kg^{-1} ; R – constante universal dos gases; $8,314 \text{ kJ.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Ao integrar a Equação 22 e assumir que o calor isostérico líquido de sorção independe da temperatura, foi possível determinar o calor isostérico líquido de sorção para cada teor de água de equilíbrio, como indicado pela Equação 23.

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{\Delta h_{st}}{R}\right) \frac{1}{T_a} + C_1 \quad (23)$$

Em que: C_1 – constante do modelo, adimensional.

Determinou-se o calor isostérico integral de sorção (Q_{st}) através da soma do calor isostérico líquido de sorção ao calor latente de vaporização da água livre, conforme definido pela Equação 24.

$$Q_{st} = \Delta h_{st} + L = A \exp(BU_e) + L \quad (24)$$

Em que: Q_{st} – calor isostérico integral de sorção, kJ.kg^{-1} ; Δh_{st} – calor isostérico líquido de sorção, kJ.kg^{-1} ; L – calor latente de vaporização da água livre, kJ.kg^{-1} ; A e B – coeficientes do modelo.

O calor latente de vaporização da água livre é um componente fundamental na avaliação do consumo de energia durante o processo de secagem. Corresponde a quantidade de energia necessária para transformar uma unidade de massa de uma substância da fase líquida para a gasosa em uma determinada temperatura (Li, 2021; Van den Berg; Bruin, 1981). O calor latente de vaporização pode ser obtido através da Equação 25, em que se emprega a temperatura média ($\bar{T}$) aplicada no estudo.

$$L = 2502,1 - 2,39\bar{T} \quad (25)$$

Em que: $\bar{T}$ – temperatura média da faixa de estudo, $^{\circ}\text{C}$.

3.6.2. Entropia diferencial

A entropia diferencial é uma propriedade termodinâmica que revela o grau de desordem de um sistema, sendo associada aos processos de dissolução, cristalização e hidratação de produtos agrícolas (Lago et al., 2013; Madamba et al., 1996). Essa pode ser obtida pela equação de Gibbs-Helmholtz (Equação 26).

$$\Delta S = \frac{\Delta h_{st} - \Delta G}{T_a} \quad (26)$$

Em que: ΔS – entropia diferencial de sorção, $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$; Δh_{st} – calor isostérico líquido de sorção, kJ.kg^{-1} ; ΔG – energia livre de Gibbs, $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{mol}^{-1}$; T_a – temperatura absoluta, K .

3.6.3. Energia livre de Gibbs

A energia livre de Gibbs corresponde a energia do sistema durante a conversão térmica da biomassa e fornece informações sobre a direção da reação e a tendência de ocorrência (Gozke, 2022). Pode ser determinada pela relação linear entre a entalpia e a entropia diferencial (Telis-Romero et al., 2005; McMinn et al., 2005), conforme a Equação 27.

$$\Delta G = \pm RT_a \ln(a_w) \quad (27)$$

Em que: ΔG – energia livre de Gibbs, kJ.mol^{-1} ; R – constante universal dos gases; $8,314 \text{ J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T_a – temperatura absoluta, K; a_w – atividade de água, decimal.

Essa função termodinâmica indica a afinidade entre o produto e a água, de forma a informar a espontaneidade ($\Delta G < 0$) ou não espontaneidade ($\Delta G > 0$) do processo de sorção. Portanto, o sinal positivo (+) está associado ao processo de adsorção, enquanto o sinal negativo (-) corresponde à dessorção. Mudanças na sorção da água afetam a energia livre de Gibbs e o calor isostérico integral. Substituindo Equação 26 na Equação 27, tem-se:

$$\pm \ln a_w = \frac{\Delta h_{st}}{R T_a} - \frac{\Delta S}{R} \quad (28)$$

3.6.4. Teoria da compensação entalpia-entropia

A teoria da compensação entalpia-entropia, também denominada teoria isocinética, descreve uma relação linear entre dois parâmetros termodinâmicos: a entalpia e a entropia, e estão associados aos fenômenos físicos e químicos de sorção da água (Griessen; Dam, 2021; Alves et al., 2015). A variação da entalpia está associada à interação das moléculas de água com o solvente durante a sorção, enquanto a mudança da entropia se refere às forças de ligação ou repulsão no sistema (Alves et al., 2015). A teoria deve ser avaliada pelo teste de Krug (Krug et al., 1976a; Krug et al., 1976b), que compara a temperatura isocinética com a temperatura média harmônica (Equação 29).

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i}} \quad (29)$$

Em que: T_{hm} – média harmônica da temperatura, K; n – número de temperaturas usadas; T_i – temperatura da i -ésima isoterma, K.

O intervalo de confiança da temperatura isocinética será obtido pela Equação 30:

$$T_B = \hat{T}_B \pm t_{(m-2, \frac{\alpha}{2})} \sqrt{V_{ar}(T_B)} \quad (30)$$

A partir das Equações 31 e 32 é possível determinar as variáveis $\hat{T}_B$ e $V_{ar}(T_B)$, respectivamente.

$$\hat{T}_B = \frac{\sum(\Delta H - \Delta \bar{H})(\Delta S - \Delta \bar{S})}{\sum(\Delta S - \Delta \bar{S})^2} \quad (31)$$

$$V_{ar}(T_B) = \frac{\sum(\Delta H - \Delta \bar{G}_B - \hat{T}_B \Delta S)^2}{(m-2)(\Delta S - \Delta \bar{S})^2} \quad (32)$$

Em que: m – número de pares de dados de entalpia e entropia; $\Delta \bar{H}$ – entalpia média; kJ.kg^{-1} ; $\Delta \bar{S}$ – entropia média, $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

A teoria da compensação linear entalpia-entropia só é verdadeira se a temperatura isocinética (T_B) for diferente da média harmônica da temperatura (T_{hm}). Caso $T_B > T_{hm}$, diz-se que o processo é regido pela entalpia, e caso contrário ($T_B < T_{hm}$) esse é controlado pela entropia (Alves et al., 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Modelagem matemática das isotermas de sorção

As Tabelas 4 e 5 apresentam as estimativas dos parâmetros dos modelos ajustados aos dados experimentais de adsorção e dessorção de caroços de algodão com linter, bem como os respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo (MRE), desvio padrão da estimativa (SDE), Critério de Informação de Akaike (AIC), Critério de Informação Bayesiano (BIC) e a classificação da distribuição dos resíduos, representadas pelas figuras 13 e 14 no Apêndice A.

A avaliação do ajuste dos modelos baseou-se na análise conjunta desses indicadores. O desempenho de um modelo é considerado satisfatório quando os valores do coeficiente de determinação (R^2) são superiores a 98%, associados a erro médio relativo (MRE) inferior a 10% e a valores da raiz do desvio padrão da estimativa (SDE) inferiores a 1, evidenciando a precisão do ajuste estatístico e validando a sua utilização para fins práticos (Zhang et al., 2022). Ainda que a análise estatística indique desempenho satisfatório do modelo, torna-se imprescindível avaliar a distribuição dos resíduos, uma vez que a presença de viés pode resultar em uma distribuição assimétrica, comprometendo a confiabilidade do ajuste (Jaques et al., 2022).

A análise estatística dos dados de adsorção (Tabela 4) demonstra que a maioria dos modelos testados obteve um coeficiente de determinação (R^2) superior a 97% o que indica, inicialmente, um ajuste satisfatório dos dados experimentais. No entanto, a seleção do modelo mais representativo não deve basear-se exclusivamente no R^2 que isoladamente pode não ser suficiente para atestar a qualidade do ajuste em curvas não-lineares. Ao analisar o Erro Médio Relativo (MRE), observa-se que os modelos Copace, GAB Modificado, Halsey Modificado, Sigma Copace e Smith apresentaram valores abaixo de 5%, o que indica uma elevada precisão, conforme documentado na literatura especializada que considera valores de MRE inferiores a 10% como indicadores de um bom ajuste prático.

Tabela 4. Estimativa dos parâmetros para os modelos de equilíbrio higroscópico no processo de adsorção de caroços de algodão com linter.

Modelo	Parâmetros*	R^2 %	MRE %	SDE $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$	AIC	BIC	Distribuição dos resíduos
Cavalcanti Mata	a: 0,003082 b: 0,266972 c: 2,086008	98,34	8,56	0,74	49,74	52,87	Tendencioso

Copace	a: 1,482361 b: 0,005338 c: 1,598823	99,61	3,46	0,36	19,51	22,65	Aleatório
Copace II	a: 1,667470 b: 1,957373 c: 1,714971	97,75	10,12	0,86	56,15	59,28	Tendencioso
Copace III	a: 0,050645 b: -0,093704	97,42	9,34	0,90	56,93	59,02	Aleatório
Chen Clayton	a: 3,258670 b: 0,204260 c: 0,130467	98,80	7,58	0,63	42,99	46,12	Tendencioso
Chung Pfof	a: 25,465070 b: 4,074630 c: 57,495430	98,68	7,24	0,66	44,96	48,10	Tendencioso
GAB modificado	a: 5,174800 b: 0,799000 c: 999,2899	98,92	4,87	0,60	40,74	43,87	Aleatório
Halsey modificado	a: 4,421845 b: 0,010277 c: 2,147054	99,72	2,73	0,31	12,72	15,86	Aleatório
Harkins-Jura	a: 2,576762 b: 0,005364 c: 0,611926	99,07	5,88	0,56	37,70	40,83	Tendencioso
Henderson modificado	a: 0,000080 b: 58,574140 c: 2,094630	98,40	8,49	0,73	48,97	52,10	Tendencioso
Oswin modificado	a: 9,775706 b: -0,043509 c: 2,972617	99,42	4,93	0,44	27,95	31,09	Tendencioso
Sabbah	a: 23,501310 b: 0,677440 c: 0,139740	96,05	12,95	1,14	67,73	70,86	Tendencioso
Sigma Copace	a: 0,691577 b: 0,005061 c: 0,932193	99,72	2,51	0,30	12,41	15,54	Aleatório
Sigma Copace II	a: 0,048200 b: 0,272700 c: 165,4591	38,52	39,29	3,77	118,09	121,22	Aleatório
Smith	a: 5,264639 b: 0,044150 c: 6,138202	99,69	2,66	0,32	14,51	17,64	Aleatório

Fonte: A autora (2026).

*Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

Para refinar a seleção e aplicar o princípio da parcimônia, analisaram-se o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Critério de Informação Bayesiano (BIC). Esses permitem avaliar o compromisso entre a qualidade do ajuste e a complexidade do modelo, penalizando

equações com maior número de parâmetros que não contribuem significativamente para a melhoria da predição (Ferreira Júnior, 2018). Neste contexto, o modelo Sigma Copace destacou-se com os menores valores absolutos ($AIC = 12,41$ e $BIC = 15,54$), seguido pelo modelo Halsey Modificado ($AIC = 12,71$ e $BIC = 15,86$). Estes baixos valores confirmam que estes modelos capturam a tendência dos dados com a máxima eficiência estatística e menor perda de informação.

O critério decisivo para a validação estatística dos modelos foi a análise da distribuição dos resíduos. Embora modelos como Harkins–Jura e Oswin Modificado tenham apresentado elevados coeficientes de determinação ($R^2 > 99\%$), ambos exibiram resíduos com comportamento tendencioso, indicando a presença de desvios sistemáticos em determinadas faixas de atividade de água. Esse padrão sugere que tais modelos tendem a superestimar ou subestimar os dados experimentais, comprometendo sua confiabilidade para fins preditivos. Entre os modelos que apresentaram distribuição aleatória dos resíduos, destacaram-se o Halsey Modificado e o Sigma Copace, ambos com coeficiente de determinação de 99,72%. No entanto, o modelo Sigma Copace apresentou desempenho superior, evidenciado pelos menores valores de erro médio relativo ($MRE = 2,51\%$) e erro padrão da estimativa ($SDE = 0,30 \text{ kg}_{\text{de água}} \cdot \text{kg}_{\text{de matéria seca}}^{-1}$, b.s.), aliados aos menores coeficientes AIC e BIC, confirmando sua maior robustez estatística.

Modelos como Halsey Modificado, Smith e Copace também apresentaram desempenhos satisfatórios, com valores de R^2 superiores a 99% e erros médios relativos próximos a 5%. O modelo Halsey Modificado, em particular, com um MRE de 2,73% e SDE igual a 0,31, comporta-se como uma alternativa robusta ao Sigma Copace. Em contrapartida, o modelo Sigma Copace II demonstrou ser inadequado para representar as isotermas de adsorção deste produto nas condições estudadas. O baixo coeficiente de determinação (38,52%) associado a um erro médio relativo excessivamente alto (39,29%) desqualifica a sua aplicação. Da mesma forma, os modelos Copace II e Sabbah, apesar de um R^2 razoável, apresentaram um erro médio relativo de 10,12 e 12,95% acima do limite aceitável de 10%, sugerindo uma menor precisão nas estimativas em comparação aos demais modelos citados. Outro fator limitante foi a distribuição tendenciosa (não aleatória) dos resíduos, corroborando para a inadequação desses para a descrição do fenômeno.

No processo de dessorção (Tabela 5), a análise da distribuição dos resíduos evidenciou que, apesar de diversos modelos apresentarem elevados coeficientes de determinação, a maioria deles, como Copace, Oswin Modificado e Smith, apresentou comportamento tendencioso dos

resíduos. A utilização de modelos com resíduos tendenciosos pode acarretar erros cumulativos nas simulações, comprometendo a confiabilidade dos resultados.

Tabela 5. Estimativa dos parâmetros para os modelos de equilíbrio higroscópico no processo de dessorção de caroços de algodão com línter.

Modelo	Parâmetros*	R² %	MRE %	SDE kg_{água}.kg_{ms}⁻¹	AIC	BIC	Distribuição dos resíduos
Cavalcanti Mata	a: 0,001535 b: 0,424167 c: 2,043468	97,77	10,73	1,06	64,98	68,11	Tendencioso
Copace	a: 1,716617 b: 0,009132 c: 1,623846	99,45	4,62	0,53	35,74	38,88	Tendencioso
Copace II	a: 1,739856 b: 3,231610 c: 1,757602	98,03	9,26	1,00	62,38	65,51	Tendencioso
Copace III	a: 0,040885 b: -0,08625	94,59	12,95	1,60	81,28	83,37	Aleatório
Chen Clayton	a: 2,169521 b: 0,340128 c: 0,073945	98,31	8,61	0,93	59,19	62,32	Tendencioso
Chung Pfof	a: 27,548210 b: 4,774370 c: 26,505660	97,60	10,07	1,10	66,53	69,66	Tendencioso
GAB modificado	a: 5,994300 b: 0,812000 c: 768,2451	96,71	9,30	1,29	72,85	75,98	Tendencioso
Halsey modificado	a: 4,888012 b: 0,018224 c: 2,120600	99,70	3,03	0,40	23,35	26,48	Aleatório
Harkins- Jura	a: 2,796626 b: 0,009131 c: 0,582767	98,81	7,71	0,78	51,89	55,02	Tendencioso
Henderson modificado	a: 0,000110 b: 27,578730 c: 2,048840	97,98	10,33	1,01	62,91	66,04	Tendencioso
Oswin modificado	a: 12,348730 b: -0,087330 c: 2,928990	99,18	6,24	0,65	44,02	47,16	Tendencioso
Sabbah	a: 35,256970 b: 0,692660 c: 0,219120	95,47	15,22	1,53	80,11	83,24	Tendencioso
Sigma Copace	a: 0,916835 b: 0,008849 c: 0,945216	99,75	2,53	0,36	19,19	22,32	Aleatório
Sigma Copace II	a: -0,997408 b: -0,014638	98,21	8,90	0,96	60,49	63,63	Tendencioso

	c: -0,073109						
	a: 6,983202						
Smith	b: 0,083722	98,97	5,54	0,73	48,99	52,12	Tendencioso
	c: 7,245075						

Fonte: A autora (2026).

*Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

Entre os modelos que satisfizeram o critério de aleatoriedade foram Copace III, Halsey Modificado e Sigma Copace sendo que, dentre esses o modelo Sigma Copace demonstrou melhores ajustes com R^2 igual a 99,75%, MRE de 2,53 e SDE de $0,36 \text{ kg}_{\text{de água}} \cdot \text{kg}_{\text{de matéria seca}}^{-1}$, b.s. A diferença significativa nos valores de AIC (19,19) e BIC (22,32) do Sigma Copace em relação aos demais modelos no processo de dessorção evidencia que esta equação possui a melhor verossimilhança. O baixo valor de BIC é particularmente relevante, pois sugere que o modelo é estável e evita o *overfitting*, garantindo que a equação descreve o fenômeno físico real da saída de água do produto e não apenas ruídos experimentais (Akaike, 1974; Schwarz, 1978).

A análise da higroscopicidade dos caroços de algodão deslintados fundamenta-se nos parâmetros estatísticos apresentados nas Tabelas 6 e 7. A avaliação conjunta do coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo (MRE) e dos critérios AIC e BIC e da distribuição de resíduos, permitiu determinar o modelo mais representativo para este produto. Seguiu-se como critérios de prioridade modelos com $R^2 > 98\%$, $\text{MRE} < 10\%$ e distribuição aleatória dos resíduos (Figuras 15 e 16, Apêndice B).

Para o processo de adsorção (Tabela 6), verifica-se uma variabilidade significativa no desempenho dos modelos. Embora equações como Copace e Smith tenham apresentado elevados coeficientes de determinação ($R^2 > 99\%$), a análise dos resíduos revelou uma distribuição tendenciosa. Isto invalida a sua utilização para predições rigorosas, pois indica que os modelos falham em capturar a variação real do teor de água de equilíbrio em determinadas faixas de atividade de água. Nota-se ainda que o modelo Sigma Copace II obteve um ajuste insatisfatório ($R^2 = 45,60\%$), demonstrando não ser aplicável a este fenômeno.

Entre os modelos que satisfizeram a condição de aleatoriedade dos resíduos estão Chen Clayton, GAB Modificado, Halsey Modificado e Sigma Copace. O modelo Sigma Copace demonstrou superioridade estatística em relação aos demais, apresentando coeficiente de determinação igual a 99,78%, menores desvios, com MRE de 2,57% e SDE de $0,26 \text{ kg}_{\text{de água}} \cdot \text{kg}_{\text{de matéria seca}}^{-1}$, b.s e melhor ajuste parcimonioso com AIC de 6,44 e BIC igual a 9,57. A aleatoriedade na distribuição dos seus resíduos confirma que o modelo está isento de viés

sistemático, sendo capaz de prever com precisão o teor de água de equilíbrio em toda a faixa de atividade de água estudada. O modelo Halsey Modificado surge como a segunda melhor opção, com R^2 de 99,72%, MRE igual a 3,15%, SDE de $0,30 \text{ kg}_{\text{de água}} \cdot \text{kg}_{\text{de matéria seca}}^{-1}$, b.s, AIC de 11,64 e BIC 14,77, mantendo a distribuição aleatória.

No processo de dessorção para os caroços de algodão deslintados (Tabela 7), os resultados evidenciam uma elevada precisão experimental, caracterizada por erros médios significativamente baixos. A maioria dos modelos testados obteve R^2 acima de 94% e MRE inferior a 5%, o que reflete a estabilidade do processo de perda de água no produto deslintado.

Observa-se que modelos como Chung Pfoest, Henderson Modificado e Oswin Modificado, apresentaram distribuição tendenciosa dos resíduos. Por outro lado, os modelos Copace e Sigma Copace destacaram-se com os melhores ajustes estatísticos. O modelo de Copace apresentou maior coeficiente de determinação, R^2 igual a 99,61% e menores MRE e SDE, correspondentes a 1,71 e 0,13, respectivamente. Contudo, o modelo Sigma Copace demonstrou desempenho estatístico similar, com R^2 igual a 99,41%, MRE de 1,90 e SDE de $0,16 \text{ kg}_{\text{de água}} \cdot \text{kg}_{\text{de matéria seca}}^{-1}$, b.s, apresentando uma diferença decimal em relação ao modelo de Copace. Em relação aos parâmetros AIC e BIC, o modelo Copace apresentou valores de -12,83 e -11,13, respectivamente, enquanto para o modelo Sigma Copace, os valores foram de -7,53 e -5,84. A análise dos critérios de informação (AIC e BIC) revelou valores negativos para os modelos de melhor desempenho. Matematicamente, isto ocorre quando o logaritmo da variância do erro residual é negativo, indicando uma variância extremamente baixa. Portanto, quanto "mais negativo" for o valor, melhor é o ajuste (Burnham; Anderson, 2002).

Diante da equivalência estatística entre os modelos Copace e Sigma Copace e visando a padronização para fins comparativos com as isotermas de adsorção e com os dados dos caroços com linter, o modelo Sigma Copace foi selecionado para representar as isotermas de dessorção neste estudo. Essa escolha assegura a robustez estatística, garantida pela aleatoriedade dos resíduos e baixos erros, ao mesmo tempo que permite a análise comparada dos parâmetros físicos.

Tabela 6. Estimativa dos parâmetros para os modelos de equilíbrio higroscópico no processo de adsorção de caroços de algodão deslintado.

Modelo	Parâmetros*	R^2 %	MRE %	SDE $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$	AIC	BIC	Distribuição dos resíduos
Cavalcanti Mata	a: 0,001448 b: 0,414015 c: 2,22389	97,54	10,58	0,89	57,33	60,46	Tendencioso

Copace	a: 1,597174 b: 0,008074 c: 1,511741	99,39	4,38	0,44	28,18	31,31	Tendencioso
Copace II	a: 1,629847 b: 2,896066 c: 1,651903	98,24	8,45	0,75	50,39	53,52	Tendencioso
Copace III	a: 0,052129 b: -0,091945	94,65	12,61	1,26	71,32	73,41	Tendencioso
Chen Clayton	a: 2,892874 b: 0,292891 c: 0,106656	98,29	8,24	0,74	49,75	52,88	Aleatório
Chung Pfof	a: 22,71327 b: 3,813730 c: 28,44170	97,85	8,91	0,83	54,51	57,64	Tendencioso
GAB modificado	a: 5,139000 b: 0,796000 c: 1109,897	97,02	8,66	0,97	61,27	64,40	Aleatório
Halsey modificado	a: 4,855840 b: 0,017196 c: 2,265778	99,72	3,15	0,30	11,64	14,77	Aleatório
Harkins-Jura	a: 2,700364 b: 0,008115 c: 0,680087	98,50	7,77	0,69	46,96	50,09	Tendencioso
Henderson modificado	a: 0,000100 b: 29,01265 c: 2,228880	97,74	10,21	0,85	55,58	58,71	Tendencioso
Oswin modificado	a: 10,41510 b: -0,066980 c: 3,152510	99,09	6,39	0,54	36,51	39,64	Tendencioso
Sabbah	a: 27,02230 b: 0,626170 c: 0,197640	94,93	14,75	1,26	72,21	75,34	Tendencioso
Sigma Copace	a: 0,843570 b: 0,007810 c: 0,884604	99,78	2,57	0,26	6,44	9,57	Aleatório
Sigma Copace II	a: 0,042200 b: 0,317400 c: 163,9963	45,60	35,84	3,58	115,9	119,0	Tendencioso
Smith	a: 6,070202 b: 0,064255 c: 5,787361	99,23	4,57	0,50	33,18	36,32	Tendencioso

Fonte: A autora (2026).

*Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

Tabela 7. Estimativa dos parâmetros para os modelos de equilíbrio higroscópico no processo de dessorção de caroços de algodão deslintado.

Modelo	Parâmetros*	R² %	MRE %	SDE kg_{água}·kg_{ms}⁻¹	AIC	BIC	Distribuição dos resíduos
Cavalcanti Mata	a: 0,000014 b: 0,714673 c: 4,072355	97,72	3,55	0,32	9,92	11,61	Tendencioso
Copace	a: 1,766050 b: 0,007144 c: 1,096148	99,61	1,71	0,13	-12,8	-11,13	Aleatório
Copace II	a: 1,589629 b: 3,253951 c: 3,063266	94,23	6,09	0,51	21,78	23,48	Tendencioso
Copace III	a: 0,091774 b: -0,046312	85,26	9,14	0,75	31,36	32,49	Aleatório
Chen Clayton	a: 7,446696 b: 0,283305 c: 0,161590	98,63	2,51	0,25	3,35	5,05	Aleatório
Chung Pfof	a: 16,924090 b: 2,447030 c: 24,788400	98,69	2,88	0,24	2,80	4,49	Tendencioso
GAB modificado	a: 6,706000 b: 0,449000 c: 1457,750	94,27	5,89	0,50	21,70	23,40	Tendencioso
Halsey modificado	a: 5,870945 b: 0,019310 c: 2,701100	99,57	1,66	0,14	-11,4	-9,75	Aleatório
Harkins- Jura	a: 3,326923 b: 0,007302 c: 2,096938	98,83	2,64	0,23	1,37	3,07	Aleatório
Henderson modificado	a: 0,000004 b: 9,270910 c: 4,050898	98,18	3,24	0,29	7,07	8,77	Tendencioso
Oswin modificado	a: 9,803416 b: -0,05776 c: 4,870007	99,04	2,36	0,21	-1,28	0,42	Tendencioso
Sabbah	a: 17,219620 b: 0,285390 c: 0,175600	96,97	4,05	0,37	13,60	15,30	Tendencioso
Sigma Copace	a: 1,015866 b: 0,007049 c: 0,788189	99,41	1,90	0,16	-7,53	-5,84	Aleatório
Sigma Copace II	a: 0,086520 b: 0,172440 c: 51,404300	48,09	14,78	1,33	46,82	48,51	Aleatório
Smith	a: 6,153575 b: 0,045340 c: 4,961310	99,15	2,34	0,20	-2,71	-1,02	Aleatório

Fonte: A autora (2026).

*Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

A avaliação conjunta dos processos de sorção para o caroço de algodão com línter e deslintado permite observar que o modelo Sigma Copace é a equação mais adequada para a previsão do teor de água de equilíbrio. A sua consistência é evidenciada pela manutenção de baixos erros e aleatoriedade dos resíduos tanto no ganho (adsorção) quanto na perda (dessorção) de teor de água para ambos os produtos. A eficácia do modelo Sigma Copace é amplamente corroborada na literatura, apresentando melhores ajustes para produtos como feijão branco (Campos et al., 2021), araticum (Ferreira Júnior et al., 2020) e sementes de urunday (Isquierdo et al., 2020).

A relação entre a atividade de água e o teor de água de equilíbrio de um produto é expressa graficamente pelas isotermas de sorção. O estudo dessas curvas desempenha um papel central na engenharia de pós-colheita, pois fundamenta a determinação de teores de água seguros, essenciais para inibir a atividade fúngica e assegurar a estabilidade do produto durante o armazenamento (Tiwarei; Jian, 2023). As isotermas de equilíbrio higroscópico para os caroços de algodão com línter e deslintados, obtidas para os processos de adsorção e dessorção nas temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C, estão apresentadas na Figura 4 e Figura 5, respectivamente. As curvas ilustram os valores experimentais e as estimativas geradas pelo ajuste do modelo Sigma Copace.

A análise visual das figuras revela que, para ambos os processos (adsorção e dessorção), a relação entre o teor de água de equilíbrio (U_e) e a atividade de água (a_w) não é linear, apresentando um comportamento exponencial. De acordo com a classificação de Brunauer, estas curvas enquadram-se como isotermas do Tipo III, característico de produtos ricos em sólidos solúveis (Araújo; Pena, 2022; Brunauer et al., 1938) e com solutos que apresentam baixa afinidade por moléculas de água, como aqueles com alto teor de óleo em sua composição (Zeymer et al., 2022).

Observa-se uma influência clara da temperatura sobre a capacidade higroscópica dos produtos. Para um valor constante de atividade de água, nota-se uma tendência de redução do teor de água de equilíbrio com a elevação da temperatura. Esse fenômeno é explicado pelo aumento do estado de excitação das moléculas de água. Temperaturas mais altas fornecem maior energia cinética às moléculas de água, reduzindo a estabilidade das ligações, como pontes de hidrogênio, entre a água e os sítios de sorção da matriz dos caroços de algodão. Consequentemente, o produto torna-se menos higroscópico em temperaturas elevadas,

liberando água com maior facilidade (dessorção) ou adsorvendo menos água do ambiente (Arslan-Tontul, 2020).

A determinação dessas isotermas fornece subsídios essenciais para o manejo da pós-colheita. Considerando que o desenvolvimento fúngico (principalmente *Aspergillus* e *Penicillium*) geralmente se inicia em atividades de água superiores a 0,70, as isotermas permitem identificar o teor de água seguro para o armazenamento (Figura; Teixeira, 2023; Tapia et al, 2020). A partir da análise das isotermas, para manter a atividade de água abaixo da zona de risco (0,65 a_w) em temperatura entre 20 e 30 °C, o teor de água dos caroços de algodão com línter e deslintados devem ser mantido em patamares próximos a 0,10 $\text{kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.). O modelo Sigma Copace mostrou-se eficiente para prever esses valores, servindo como ferramenta confiável para o dimensionamento de sistemas de aeração, secagem e armazenamento.

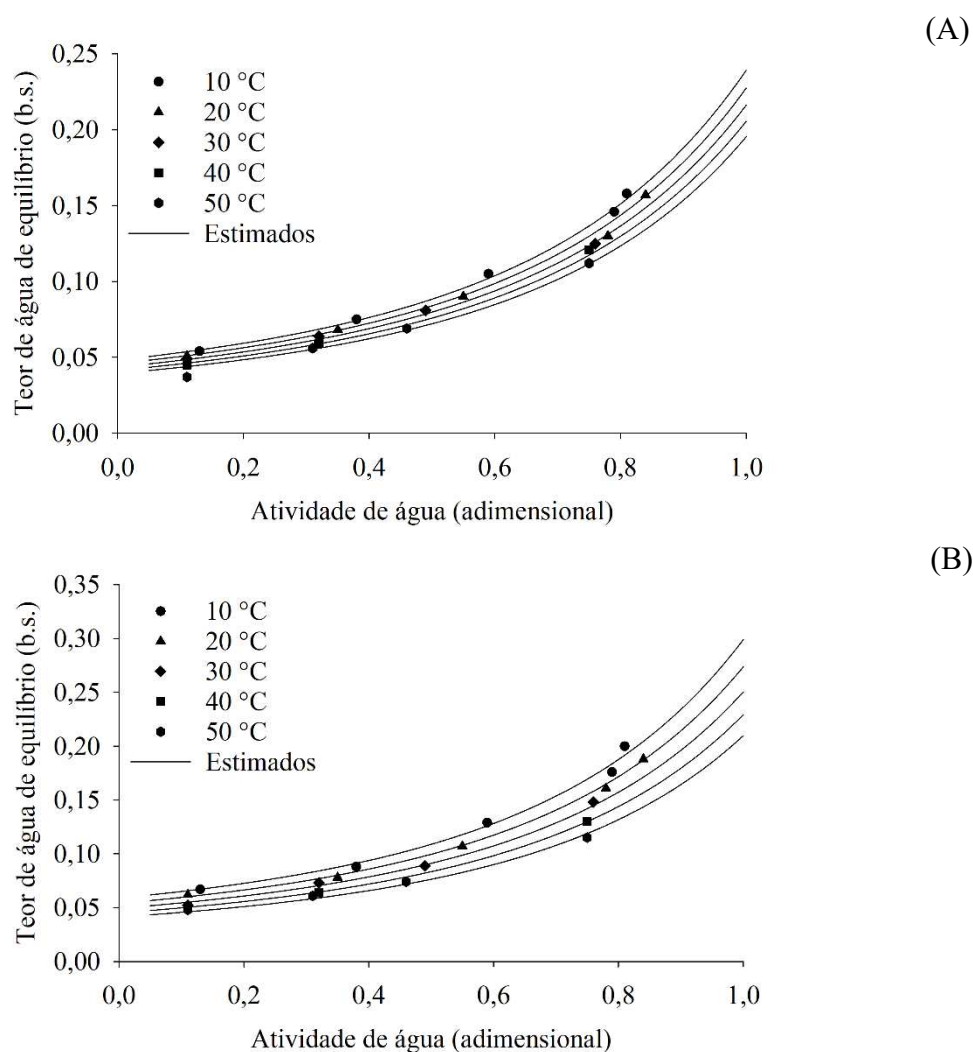
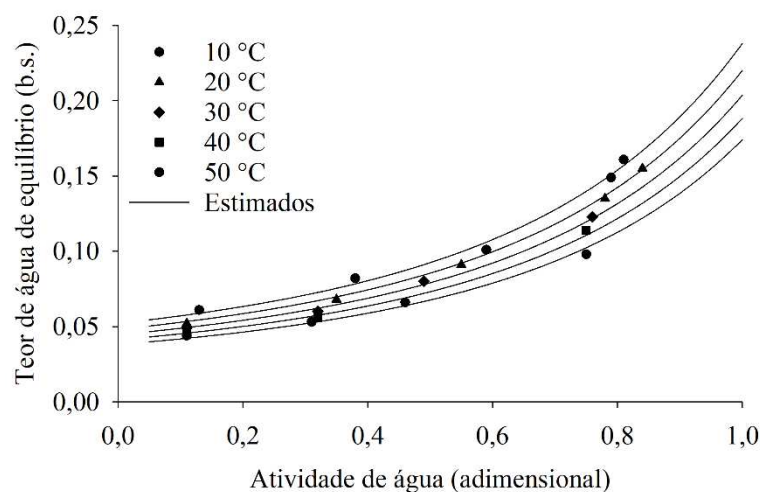


Figura 4. Isotermas de adsorção (A) e dessorção (B) observadas e estimadas pelo modelo de Sigma Copace para caroços de algodão com línter nas temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C.

(A)



(B)

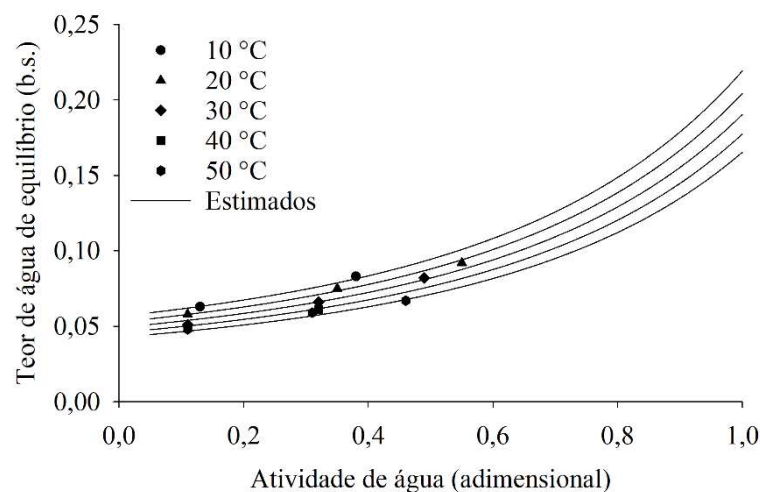


Figura 5. Isotermas de adsorção (A) e dessorção (B) observadas e estimadas pelo modelo de Sigma Copace para caroços de algodão deslintados nas temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C.

Os valores de teor de água de equilíbrio preditos pelo modelo Sigma Copace para a adsorção e dessorção dos caroços de algodão com línter e deslintados estão apresentados nas Tabelas 8 a 11, em função da umidade relativa (UR) e em base úmida (% b.u.). Essas predições foram calculadas para as diferentes combinações de temperatura e umidade relativa do ar utilizando os coeficientes ajustados do modelo. Tais dados visam subsidiar tecnicamente as unidades armazenadoras, auxiliando na prevenção de perdas e na manutenção da qualidade dos caroços de algodão armazenados.

Tabela 8. Teores de água de equilíbrio (% b.u.) para caroços de algodão com linter estimados pelo modelo Sigma Copace, para o processo de adsorção em diferentes condições de temperatura (°C) e umidade relativa (% UR).

Com Linter - Adsorção (% b.u.)																		
T (°C)	Umidade Relativa (% UR)																	
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
5	4,9	5,2	5,4	5,7	6,1	6,4	6,8	7,3	7,7	8,3	8,9	9,6	10,4	11,3	12,3	13,4	14,7	16,2
10	4,8	5,0	5,3	5,6	5,9	6,3	6,7	7,1	7,6	8,1	8,7	9,4	10,2	11,0	12,0	13,1	14,4	15,8
15	4,7	4,9	5,2	5,5	5,8	6,1	6,5	6,9	7,4	7,9	8,5	9,2	9,9	10,8	11,8	12,8	14,1	15,5
20	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	6,0	6,3	6,8	7,2	7,7	8,3	9,0	9,7	10,5	11,5	12,6	13,8	15,2
25	4,5	4,7	4,9	5,2	5,5	5,8	6,2	6,6	7,1	7,6	8,1	8,8	9,5	10,3	11,2	12,3	13,5	14,8
30	4,4	4,6	4,8	5,1	5,4	5,7	6,1	6,4	6,9	7,4	7,9	8,6	9,3	10,1	11,0	12,0	13,2	14,5
35	4,3	4,5	4,7	5,0	5,2	5,6	5,9	6,3	6,7	7,2	7,8	8,4	9,1	9,9	10,7	11,8	12,9	14,2
40	4,2	4,4	4,6	4,8	5,1	5,4	5,8	6,1	6,6	7,0	7,6	8,2	8,9	9,6	10,5	11,5	12,6	13,9
45	4,1	4,3	4,5	4,7	5,0	5,3	5,6	6,0	6,4	6,9	7,4	8,0	8,7	9,4	10,3	11,2	12,3	13,6
50	4,0	4,2	4,4	4,6	4,9	5,2	5,5	5,9	6,3	6,7	7,2	7,8	8,5	9,2	10,0	11,0	12,1	13,3

Fonte: A autora (2026).

Tabela 9. Teores de água de equilíbrio (% b.u.) para caroços de algodão com linter estimados pelo modelo Sigma Copace, para o processo de dessorção em diferentes condições de temperatura (°C) e umidade relativa (% UR).

Com Linter - Dessorção (%b.u.)																		
T (°C)	Umidade Relativa (% UR)																	
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
5	6,1	6,4	6,7	7,1	7,5	7,9	8,4	8,9	9,5	10,2	11,0	11,8	12,8	13,8	15,0	16,4	17,9	19,7
10	5,8	6,1	6,4	6,8	7,2	7,6	8,1	8,6	9,2	9,8	10,5	11,4	12,3	13,3	14,5	15,8	17,3	19,0
15	5,6	5,9	6,2	6,5	6,9	7,3	7,7	8,2	8,8	9,4	10,1	10,9	11,8	12,8	13,9	15,2	16,7	18,3
20	5,4	5,6	5,9	6,2	6,6	7,0	7,4	7,9	8,4	9,1	9,7	10,5	11,4	12,3	13,4	14,7	16,1	17,6
25	5,1	5,4	5,7	6,0	6,3	6,7	7,1	7,6	8,1	8,7	9,4	10,1	10,9	11,9	12,9	14,1	15,5	17,0
30	4,9	5,2	5,4	5,7	6,1	6,4	6,8	7,3	7,8	8,4	9,0	9,7	10,5	11,4	12,4	13,6	14,9	16,4
35	4,7	5,0	5,2	5,5	5,8	6,2	6,6	7,0	7,5	8,0	8,6	9,3	10,1	11,0	12,0	13,1	14,3	15,8
40	4,5	4,8	5,0	5,3	5,6	5,9	6,3	6,7	7,2	7,7	8,3	8,9	9,7	10,5	11,5	12,6	13,8	15,2
45	4,3	4,6	4,8	5,1	5,4	5,7	6,0	6,4	6,9	7,4	8,0	8,6	9,3	10,1	11,1	12,1	13,3	14,7
50	4,2	4,4	4,6	4,9	5,1	5,4	5,8	6,2	6,6	7,1	7,6	8,3	8,9	9,7	10,6	11,6	12,8	14,1

Fonte: A autora (2026).

Tabela 10. Teores de água de equilíbrio (b.u.) para caroços de algodão deslintado estimados pelo modelo Sigma Copace, para o processo de adsorção em diferentes condições de temperatura (°C) e umidade relativa (% UR).

Deslintado - Adsorção (% b.u.)																		
T (°C)	Umidade Relativa (% UR)																	
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
5	5,4	5,6	5,9	6,2	6,5	6,9	7,3	7,7	8,2	8,8	9,4	10,1	10,9	11,7	12,7	13,8	15,0	16,5
10	5,2	5,4	5,7	6,0	6,3	6,6	7,0	7,4	7,9	8,5	9,1	9,7	10,5	11,3	12,3	13,3	14,6	15,9
15	5,0	5,2	5,5	5,7	6,0	6,4	6,8	7,2	7,6	8,2	8,7	9,4	10,1	10,9	11,9	12,9	14,1	15,4
20	4,8	5,0	5,3	5,5	5,8	6,2	6,5	6,9	7,4	7,9	8,4	9,1	9,8	10,6	11,5	12,5	13,6	14,9
25	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,9	6,3	6,7	7,1	7,6	8,1	8,7	9,4	10,2	11,1	12,0	13,2	14,4
30	4,5	4,7	4,9	5,1	5,4	5,7	6,1	6,4	6,9	7,3	7,9	8,4	9,1	9,8	10,7	11,6	12,7	13,9
35	4,3	4,5	4,7	5,0	5,2	5,5	5,8	6,2	6,6	7,1	7,6	8,1	8,8	9,5	10,3	11,2	12,3	13,5
40	4,1	4,3	4,5	4,8	5,0	5,3	5,6	6,0	6,4	6,8	7,3	7,9	8,5	9,2	10,0	10,9	11,9	13,0
45	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,1	5,4	5,8	6,1	6,6	7,0	7,6	8,2	8,9	9,6	10,5	11,5	12,6
50	3,8	4,0	4,2	4,4	4,7	4,9	5,2	5,6	5,9	6,3	6,8	7,3	7,9	8,5	9,3	10,1	11,1	12,2

Fonte: A autora (2026).

Tabela 11. Teores de água de equilíbrio (% b.u.) para caroços de algodão deslintado estimados pelo modelo Sigma Copace, para o processo de dessorção em diferentes condições de temperatura (°C) e umidade relativa (% UR).

Deslintado - Dessorção (% b.u.)																		
T (°C)	Umidade Relativa (% UR)																	
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
5	5,8	6,0	6,2	6,5	6,8	7,2	7,5	8,0	8,4	8,9	9,5	10,1	10,8	11,5	12,4	13,3	14,4	15,6
10	5,6	5,8	6,0	6,3	6,6	6,9	7,3	7,7	8,1	8,6	9,2	9,8	10,4	11,2	12,0	12,9	14,0	15,2
15	5,4	5,6	5,8	6,1	6,4	6,7	7,1	7,5	7,9	8,4	8,9	9,5	10,1	10,8	11,6	12,6	13,6	14,7
20	5,2	5,4	5,7	5,9	6,2	6,5	6,8	7,2	7,6	8,1	8,6	9,2	9,8	10,5	11,3	12,2	13,2	14,3
25	5,0	5,2	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	7,0	7,4	7,8	8,3	8,9	9,5	10,2	10,9	11,8	12,8	13,9
30	4,9	5,1	5,3	5,5	5,8	6,1	6,4	6,8	7,1	7,6	8,1	8,6	9,2	9,9	10,6	11,4	12,4	13,4
35	4,7	4,9	5,1	5,3	5,6	5,9	6,2	6,5	6,9	7,3	7,8	8,3	8,9	9,5	10,3	11,1	12,0	13,0
40	4,6	4,7	4,9	5,2	5,4	5,7	6,0	6,3	6,7	7,1	7,5	8,1	8,6	9,2	10,0	10,7	11,6	12,6
45	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,5	5,8	6,1	6,5	6,9	7,3	7,8	8,3	9,0	9,6	10,4	11,3	12,3
50	4,3	4,4	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,9	6,3	6,6	7,1	7,5	8,1	8,7	9,3	10,1	10,9	11,9

Fonte: A autora (2026).

4.2 Histerese

Ao comparar as curvas de adsorção e dessorção para os caroços de algodão com línter (Figura 6) e deslintados (Figura 7), observa-se que, para uma mesma atividade de água e temperatura, o teor de água de equilíbrio na dessorção é superior ao obtido na adsorção. Este comportamento caracteriza o fenômeno de histerese, comum em produtos agrícolas e materiais porosos.

Embora a origem exata da histerese não esteja bem estabelecida, uma explicação comum para a histerese em materiais porosos é uma combinação da teoria do frasco de tinta e do ângulo de contato em superfícies curvas (Rosenow et al., 2025). A histerese observada nos caroços de algodão pode ser atribuída principalmente à teoria do bloqueio de poros (efeito frasco de tinta) ou devido às alterações estruturais da matriz sólida. Para a teoria do efeito franco de tinta, durante a dessorção, a água retida no interior de poros estreitos com gargalos menores encontra maior resistência para sair do que para entrar, mantendo o teor de água mais elevado (Mualem, 1974). Além disso, a rigidez da estrutura celular do tegumento e das fibras do línter pode sofrer alterações estruturais irreversíveis durante o processo de dessorção, alterando a disponibilidade dos sítios de ligação para a reidratação (adsorção). Como resultado, o processo de adsorção não segue o mesmo caminho termodinâmico da dessorção, levando a teores de água de equilíbrio distintos para uma mesma atividade de água (Kapsalis, 2017; Rizvi, 2014; Iglesias; Chirife, 1976).

O comportamento de histerese pode variar entre diferentes produtos, inclusive de mesma natureza, que podem apresentar isothermas distintas em função de alterações em variáveis externas ou condições de processamento (Luna-Flores et al., 2023). Para os caroços de algodão com línter (Figura 6), observa-se que o fenômeno de histerese se manifestou de forma mais pronunciada, indicando que o processo de sorção não é completamente reversível.

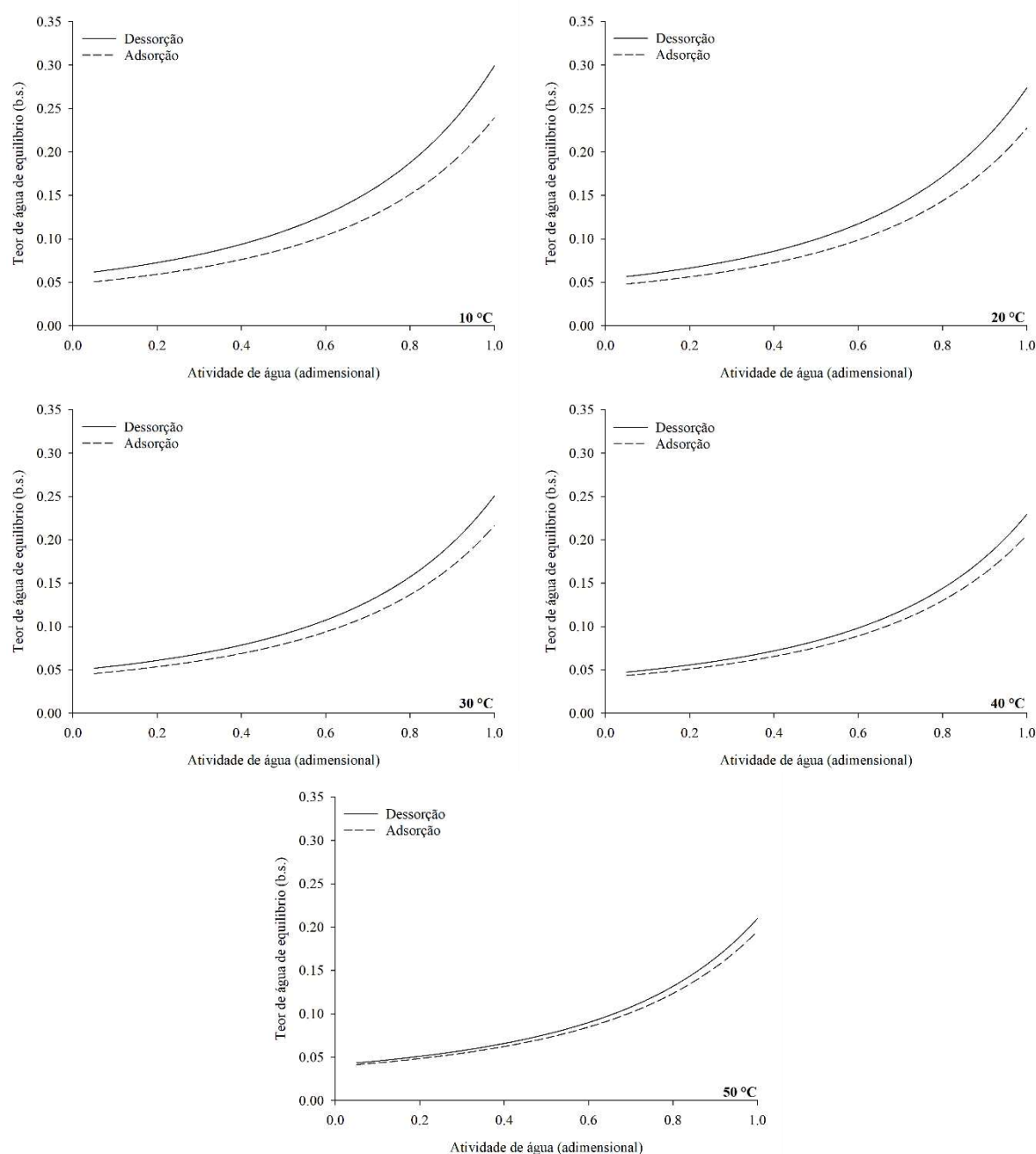


Figura 6. Representação gráfica do fenômeno de histerese entre as curvas de adsorção e dessorção previstas pelo modelo Sigma Copace para caroços de algodão com línter a temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C.

Esse comportamento pode ser atribuído a modificações estruturais no material durante os ciclos de sorção associadas à presença do línter. As fibras celulósicas podem sofrer inchamento durante a adsorção de água e, subsequentemente colapsar ou se rearranjar durante a dessorção, alterando a disponibilidade e a energia dos sítios ativos de ligação. Como consequência, ocorre maior retenção de água na matriz do material durante a dessorção em comparação à quantidade de moléculas de água retidas durante a adsorção sob a mesma pressão

parcial de vapor. Comportamento semelhante foi relatado por Luo et al. (2024) para sementes de coix (*Coix lachrymajobi* L.), nas quais foram observadas histereses significativas entre as isotermas de adsorção e dessorção. Segundo os autores, essas diferenças indicam que os processos devem ser considerados de forma independente quando utilizados no controle da temperatura e do teor de água durante o armazenamento de produtos agrícolas, como os caroços de algodão.

Um fator adicional que pode explicar a magnitude da histerese observada está relacionado às amostras utilizadas no processo de dessorção. Neste estudo, os caroços de algodão com línter foram colhidos intencionalmente antes do estágio ideal de abertura dos capulhos, com o objetivo de obter amostras com teores de água naturalmente elevados. O fato das fibras e o tegumento não terem sido submetidos previamente a ciclos de secagem natural ou durante o beneficiamento do algodão e nem terem sido submetidos a processos mecânicos de descaroçamento pode ter contribuído para a preservação da integridade e da rigidez inicial da estrutura capilar. Nessas condições, a água encontra-se retida com maior energia nos microporos do material, o que explica os valores de teor de água de equilíbrio na dessorção serem substancialmente superiores aos observados na adsorção, intensificando o fenômeno de histerese.

Ao analisar a evolução das curvas de 10 °C para 50 °C, nota-se que a magnitude da histerese tende a sofrer uma leve redução com o aumento da temperatura. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento na elasticidade das paredes capilares e à maior capacidade de formar ligações de hidrogênio entre a matéria seca e a água presente no produto (Zeymer et al., 2022).

Para os caroços de algodão deslintados (Figura 7), observa-se que as curvas de adsorção e dessorção apresentam menor diferença quando comparadas às dos caroços com línter, indicando um fenômeno de histerese menos pronunciado. Em função da natureza do beneficiamento, que envolve etapas térmicas, químicas e mecânicas, os caroços deslintados tendem a apresentar baixos teores de água ao final do processo. No caso de sementes, após o deslintamento é realizada uma etapa adicional de secagem, visando adequar o teor de água às condições recomendadas para conservação da qualidade fisiológica. Neste estudo, o teor de água máximo inicial obtido para os caroços deslintados foi de aproximadamente 0,092 kg_{água}.kg_{ms}⁻¹ (b.s.), o que permitiu a condução do processo de dessorção apenas até uma atividade de água experimental máxima de 0,55 (adimensional).

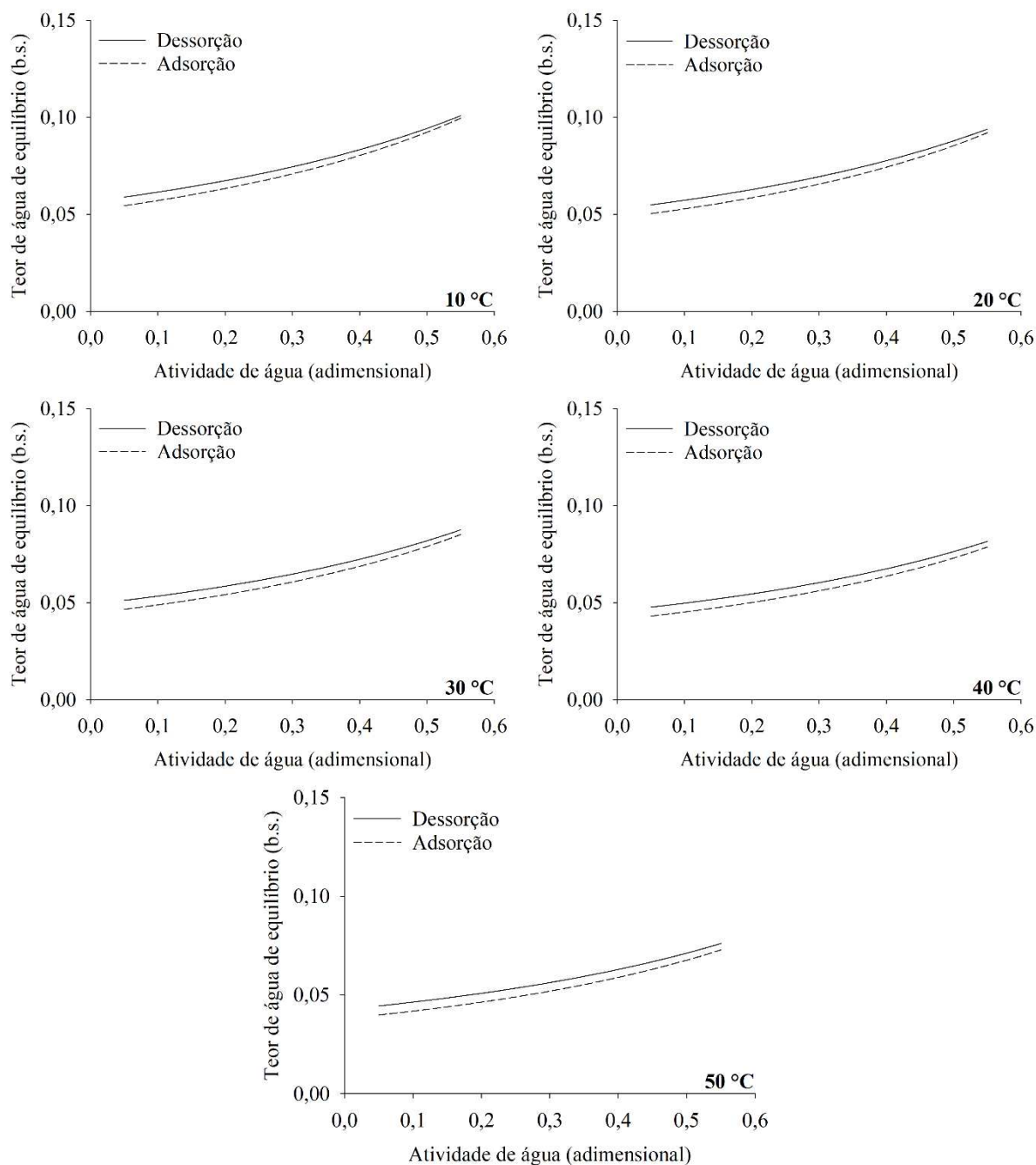


Figura 7. Representação gráfica do fenômeno de histerese entre as curvas de adsorção e dessorção preditas pelo modelo Sigma Copace para caroços de algodão deslintados a temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C.

Além da menor magnitude da histerese, observa-se que o aumento da temperatura promoveu deslocamento das isotermas para menores teores de água de equilíbrio, tanto na adsorção quanto na dessorção. Esse comportamento evidencia a redução da afinidade da água pelos sítios ativos do material em temperaturas mais elevadas, decorrente do aumento da

energia cinética das moléculas de água e da diminuição das forças de ligação entre água e matriz sólida. Como consequência, para uma mesma atividade de água, menores quantidades de água permaneceram adsorvidas nos caroços em condições de maior temperatura (Sik et al., 2010).

4.3 Propriedades termodinâmicas

As Tabelas 12 a 15 apresentam os valores de atividade de água (adimensional), calculados a partir dos coeficientes estimados pelo modelo Sigma-Copace para os processos de adsorção e dessorção dos caroços de algodão com línter e deslinterados. Os valores foram obtidos a partir de teores de água de equilíbrio variando de 0,049 a 0,158 $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.) para a adsorção e de 0,061 a 0,200 $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.) para a dessorção dos caroços de algodão com línter. Para os caroços de algodão deslinterados, os teores de água de equilíbrio situaram-se entre 0,053 e 0,161 $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.) no processo de adsorção e entre 0,058 e 0,095 $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.) no processo de dessorção, considerando as temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C. A partir dessas estimativas, foi possível determinar a entalpia e a entropia diferencial para os processos de sorção de ambos os produtos.

Tabela 12. Atividade de água (adimensional) no processo de adsorção, estimados pelo modelo de Sigma Copace para caroços de algodão com línter, em função da temperatura (°C) e do teor de água de equilíbrio (b.s.).

U _e (b.s.)	Temperatura (°C)				
	10	20	30	40	50
0,049	0,0171	0,0691	0,1185	0,1656	0,2106
0,051	0,0584	0,1084	0,1559	0,2013	0,2448
0,054	0,1146	0,1619	0,2071	0,2503	0,2917
0,056	0,1488	0,1946	0,2383	0,2802	0,3204
0,059	0,1960	0,2396	0,2815	0,3216	0,3602
0,064	0,2652	0,3060	0,3452	0,3830	0,4193
0,068	0,3139	0,3528	0,3903	0,4263	0,4612
0,069	0,3253	0,3638	0,4008	0,4365	0,4710
0,075	0,3879	0,4241	0,4590	0,4927	0,5253
0,081	0,4424	0,4767	0,5098	0,5419	0,5730
0,090	0,5125	0,5445	0,5755	0,6056	0,6348

0,105	0,6069	0,6361	0,6644	0,6920	0,7188
0,112	0,6440	0,6721	0,6994	0,7261	0,7520
0,121	0,6866	0,7136	0,7398	0,7654	0,7903
0,125	0,7040	0,7305	0,7563	0,7815	0,8060
0,130	0,7246	0,7506	0,7759	0,8006	0,8247
0,146	0,7832	0,8077	0,8316	0,8550	0,8778
0,157	0,8182	0,8419	0,8650	0,8876	0,9097
0,158	0,8212	0,8448	0,8678	0,8904	0,9124

Fonte: A autora (2026)

U_e – teor de água de equilíbrio, $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.)

Tabela 13. Atividade de água (adimensional) no processo de dessorção, estimados pelo modelo de Sigma Copace para caroços de algodão com linter, em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e do teor de água de equilíbrio (b.s.).

U_e (b.s.)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)				
	10	20	30	40	50
0,061	0,0361	0,1225	0,2021	0,2758	0,3445
0,062	0,0525	0,1376	0,2161	0,2888	0,3566
0,064	0,0839	0,1665	0,2428	0,3136	0,3798
0,067	0,1275	0,2067	0,2801	0,3484	0,4124
0,073	0,2044	0,2779	0,3464	0,4105	0,4708
0,074	0,2160	0,2887	0,3565	0,4200	0,4797
0,078	0,2599	0,3296	0,3948	0,4560	0,5136
0,088	0,3538	0,4174	0,4773	0,5337	0,5872
0,089	0,3621	0,4253	0,4847	0,5407	0,5938
0,107	0,4894	0,5452	0,5980	0,6482	0,6960
0,115	0,5351	0,5884	0,6391	0,6873	0,7333
0,129	0,6038	0,6537	0,7013	0,7467	0,7901
0,130	0,6083	0,6580	0,7053	0,7505	0,7938
0,148	0,6803	0,7266	0,7709	0,8133	0,8540
0,161	0,7244	0,7688	0,8113	0,8520	0,8912
0,176	0,7691	0,8115	0,8523	0,8914	0,9291
0,188	0,8009	0,8421	0,8816	0,9196	0,9563

0,200	0,8299	0,8699	0,9084	0,9454	0,9811
-------	--------	--------	--------	--------	--------

Fonte: A autora (2026)

U_e – teor de água de equilíbrio, $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.)

Tabela 14. Atividade de água (adimensional) no processo de adsorção, estimados pelo modelo de Sigma Copace para caroços de algodão deslintados, em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e do teor de água de equilíbrio (b.s.).

U_e (b.s.)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)				
	10	20	30	40	50
0,053	0,0197	0,1028	0,1794	0,2506	0,3171
0,056	0,0790	0,1574	0,2301	0,2979	0,3614
0,060	0,1486	0,2219	0,2902	0,3542	0,4143
0,061	0,1645	0,2368	0,3041	0,3672	0,4266
0,066	0,2374	0,3047	0,3678	0,4271	0,4831
0,068	0,2636	0,3293	0,3908	0,4489	0,5037
0,080	0,3957	0,4534	0,5080	0,5598	0,6090
0,082	0,4143	0,4710	0,5246	0,5756	0,6240
0,093	0,5042	0,5561	0,6055	0,6526	0,6975
0,098	0,5393	0,5895	0,6373	0,6829	0,7266
0,101	0,5590	0,6082	0,6552	0,7000	0,7429
0,114	0,6343	0,6801	0,7238	0,7658	0,8060
0,123	0,6789	0,7227	0,7646	0,8049	0,8436
0,135	0,7309	0,7725	0,8125	0,8509	0,8879
0,149	0,7832	0,8227	0,8608	0,8974	0,9328
0,155	0,8034	0,8421	0,8795	0,9155	0,9502
0,161	0,8224	0,8605	0,8971	0,9325	0,9667

Fonte: A autora (2026)

U_e – teor de água de equilíbrio, $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.)

Tabela 15. Atividade de água na dessorção de caroços de algodão deslintados, estimada pelo modelo Sigma-Copace, em função da temperatura e do teor de água de equilíbrio.

U_e (b.s.)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)				
	10	20	30	40	50

0,058	0,0304	0,1136	0,1904	0,2617	0,3283
0,059	0,0512	0,1327	0,2081	0,2782	0,3438
0,061	0,0906	0,1691	0,2419	0,3098	0,3733
0,063	0,1273	0,2031	0,2735	0,3393	0,4011
0,066	0,1779	0,2501	0,3175	0,3805	0,4399
0,067	0,1938	0,2649	0,3312	0,3935	0,4521
0,075	0,3052	0,3691	0,4291	0,4857	0,5392
0,082	0,3854	0,4444	0,5002	0,5530	0,6032
0,083	0,3958	0,4542	0,5095	0,5618	0,6115
0,095	0,4800	0,5339	0,5850	0,6336	0,6800

Fonte: A autora (2026)

U_e – teor de água de equilíbrio, $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.)

A partir dos dados de atividade de água calculados, determinou-se o calor isostérico líquido de sorção. Esses foram determinados a partir dos coeficientes angulares, obtidos pela relação entre $\ln(a_w)$ e $1/T$ (K^{-1}) para os processos de adsorção e dessorção de caroços de algodão com línter (Figura 8) e deslinterados (Figura 9).

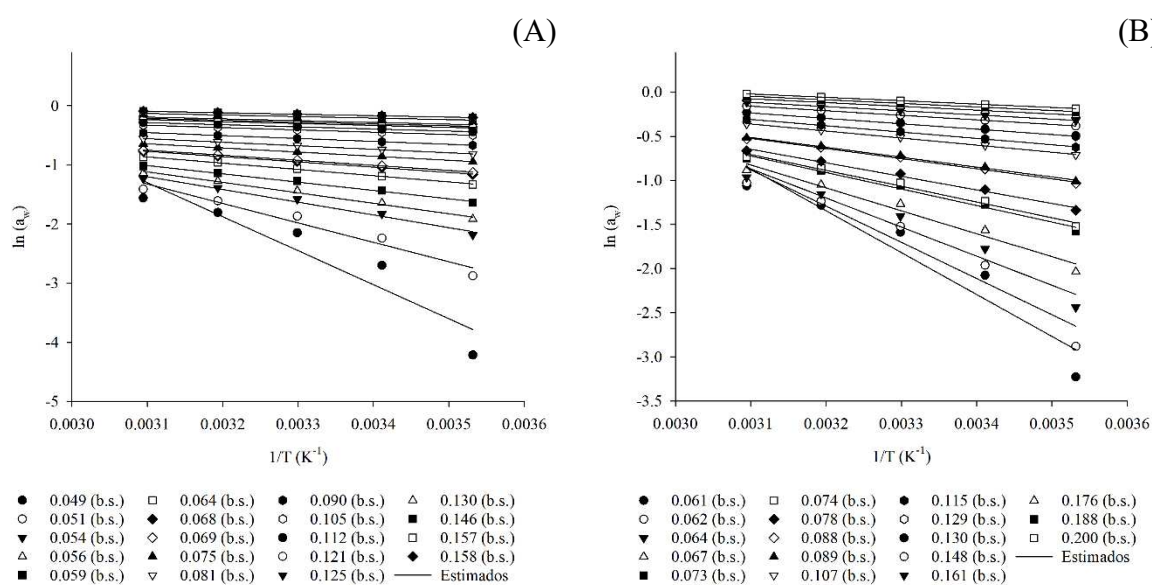


Figura 8. Curvas do logaritmo neperiano da atividade de água (adimensional) em função de $1/T$ (K^{-1}) para os teores de água de equilíbrio da adsorção (A) e dessorção (B) dos caroços de algodão com línter.

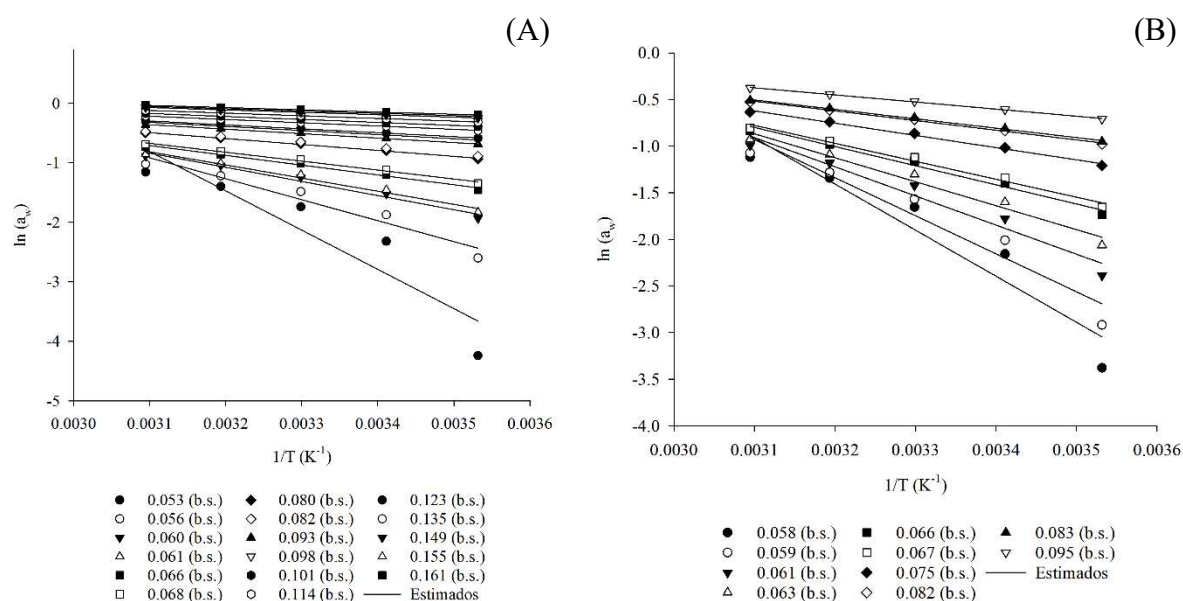


Figura 9. Curvas do logaritmo neperiano da atividade de água (adimensional) em função de $1/T$ (K^{-1}) para os teores de água de equilíbrio da adsorção (A) e dessorção (B) dos caroços de algodão deslintados.

O calor isostérico integral, também denominado entalpia integral (Q_{st}), foi obtido pela soma do calor isostérico líquido, ou entalpia diferencial (Δh_{st}), ao calor latente de vaporização da água livre (L), calculado para a temperatura de 30 °C, correspondente à temperatura média adotada neste estudo, resultando em um valor de 2430,50 $kJ.kg^{-1}$. A análise da Figura 10 apresenta o comportamento do calor isostérico integral de sorção em função do teor de água de equilíbrio para os caroços com línter (A) e deslintados (B).

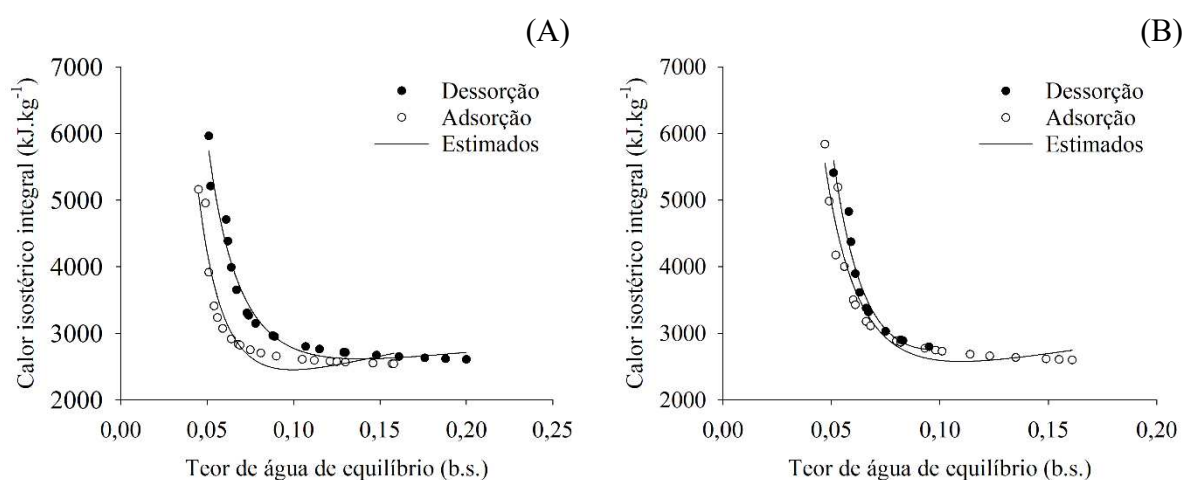


Figura 10. Variações do calor isostérico integral de sorção para os caroços de algodão com línter (A) e deslintados (B).

Observa-se que, para ambos os materiais avaliados e para os dois processos de sorção (adsorção e dessorção), o calor isostérico integral (Q_{st}) apresentou valores elevados em baixos teores de água de equilíbrio, reduzindo-se progressivamente com o aumento do teor de água. Esse comportamento evidencia uma relação inversa e de natureza exponencial entre o Q_{st} e o teor de água, característica amplamente reportada para produtos agrícolas higroscópicos.

Nos baixos teores de água, os elevados valores de Q_{st} indicam que as primeiras moléculas de água adsorvidas se encontram fortemente ligadas aos sítios ativos mais energéticos da matriz sólida, como grupos polares de proteínas, carboidratos e componentes da parede celular, formando uma camada monomolecular. Portanto, maior energia é necessária para sua remoção ou incorporação. À medida que o teor de água aumenta, ocorre a ocupação progressiva de sítios de menor energia, bem como o início da formação de camadas multilaminares de água, resultando em redução acentuada do calor isostérico integral, que tende a se aproximar do calor latente de vaporização da água livre (Ojike et al., 2022; Zhang et al., 2022; Khiari et al., 2020).

Comparativamente, verifica-se que o processo de dessorção apresentou valores de Q_{st} sistematicamente superiores aos da adsorção para um mesmo teor de água, tanto nos caroços com línfer quanto nos deslínferos. Esse comportamento reflete a histerese da sorção, associada a rearranjos estruturais da matriz sólida durante o processo de secagem, que promovem ligações mais estáveis entre a água e o material, demandando maior energia para sua remoção. A mesma tendência foi encontrada para grãos de soja (Zeymer et al., 2025), sementes de coix (Luo et al., 2024), pimenta habanero em pó (Luna-Flores et al., 2023) e figos (Hssaini et al., 2022).

De forma geral, os resultados confirmam que o comportamento do calor isostérico integral de sorção dos caroços de algodão é fortemente dependente do teor de água e do sentido do processo (adsorção ou dessorção), fornecendo informações relevantes para a modelagem termodinâmica, definição de condições de secagem, armazenamento e conservação do produto.

As equações empíricas ajustadas aos dados experimentais do calor isostérico integral de sorção, bem como seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), estão apresentadas na Tabela 16. A modelagem matemática apresentada estabelece uma correlação funcional entre a demanda energética (Q_{st}) e o teor de água do produto (U_e), permitindo a predição contínua de valores dentro da faixa experimental estudada.

Tabela 16. Equações ajustadas aos dados experimentais do calor isostérico integral (Q_{st}), em caroços de algodão com línter e deslntado.

Produto	Processo	Equação de regressão	R ² (%)
Com Línter	Adsorção	$Q_{st} = 4256,05^* + (-358,75^*/U_e) + (17,84^*/U_e^2)$	92,88
	Dessorção	$Q_{st} = 3663,76^* + (-291,20^*/U_e) + (20,23^*/U_e^2)$	97,30
Deslntado	Adsorção	$Q_{st} = 4238,80^* + (-365,21^*/U_e) + (20,07^*/U_e^2)$	94,02
	Dessorção	$Q_{st} = 6234,79^* + (-675,22^*/U_e) + (32,78^*/U_e^2)$	94,89

Fonte: A autora (2026)

*Significativo a 1% de probabilidade pelo teste “t”.

Observam-se diferenças significativas entre os processos de adsorção e dessorção, com valores de Q_{st} mais elevados na dessorção para um mesmo teor de água, o que evidencia a presença de histerese energética e confirma a irreversibilidade termodinâmica do processo de sorção. A comparação entre os produtos indica que os caroços de algodão deslntados apresentam maior exigência energética, especialmente durante a dessorção, possivelmente em decorrência das alterações estruturais promovidas pelas etapas do deslntamento. Os coeficientes de determinação, indicam ajuste satisfatório dos modelos aos dados experimentais, com melhor desempenho observado no processo de dessorção. Esses resultados ressaltam a importância de considerar separadamente os processos de adsorção e dessorção na modelagem termodinâmica e no dimensionamento de sistemas de secagem e armazenamento de caroços de algodão.

A Figura 11 ilustra o comportamento da entropia diferencial (ΔS) em função do teor de água de equilíbrio para os processos de adsorção e dessorção dos caroços de algodão com línter e deslntados, respectivamente. Observa-se, para ambos os produtos, que a entropia diferencial apresenta uma forte dependência do teor de água, seguindo uma tendência exponencial decrescente similar à observada para o calor isostérico integral. Essa correlação é esperada, uma vez que a produção de entropia está diretamente associada aos processos de transferência de calor entre sistemas, sendo sua magnitude proporcional à quantidade de calor envolvido quando a troca ocorre sob a mesma condição de temperatura (Zeymer et al., 2025).

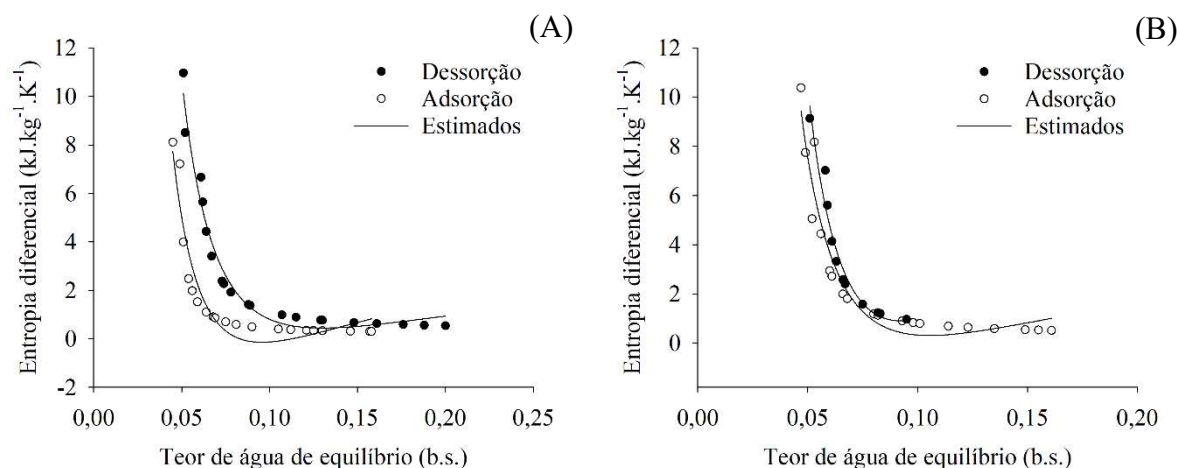


Figura 11. Variações da entropia diferencial em função do teor de água de equilíbrio para os caroços de algodão com línter (A) e deslintados (B).

Os gráficos de entropia diferencial em função do teor de água de equilíbrio evidenciam comportamento semelhante para os caroços de algodão com línter e deslintados, caracterizado por elevados valores de entropia em baixos teores de água e redução progressiva à medida que o teor de água aumenta. Esse comportamento indica que, em baixos teores de água, a água encontra-se fortemente ligada a sítios energeticamente heterogêneos, exigindo maior grau de desordem do sistema para que o equilíbrio termodinâmico seja alcançado. Com o aumento do teor de água, ocorre a ocupação gradual de sítios de menor energia, resultando em uma organização relativa da água adsorvida e consequentemente, em menores valores de entropia diferencial.

A entropia expressa o nível de desorganização de um sistema e conforme estabelece a segunda lei da termodinâmica, um processo é considerado reversível quando a variação de entropia associada a ele é nula (Yildirim, 2021). Observa-se a presença de histerese entrópica entre os processos de adsorção e dessorção, com valores mais elevados de entropia durante a dessorção para um mesmo teor de água, o que reflete a irreversibilidade estrutural do processo de sorção e a maior resistência à remoção da água retida nos sítios mais energéticos. Para os caroços com línter, essa diferença entre adsorção e dessorção é mais pronunciada, indicando maior heterogeneidade estrutural e maior influência das fibras na distribuição e na energia dos sítios de sorção. Já nos caroços deslintados, observa-se menor separação entre as curvas, especialmente em teores de água intermediários e elevados, sugerindo uma matriz mais homogênea e com menor diversidade energética dos sítios de ligação. Em ambos os produtos,

os valores de entropia em teores de água mais elevados indica a predominância de água fracamente ligada, com comportamento próximo ao da água livre.

A Tabela 17 apresenta as equações ajustadas aos dados experimentais de entropia diferencial para os processos de adsorção e dessorção dos caroços de algodão com línter e deslintados, com coeficientes de determinação para adsorção e dessorção de 91,66 e 97,16% para os caroços de algodão com línter e 93,56 e 95,45% para os caroços de algodão deslintados, o que indica boa adequação dos modelos às condições experimentais.

Tabela 17. Equações ajustadas aos dados experimentais da entropia diferencial (ΔS), em caroços de algodão com línter e deslintado.

Produto	Processo	Equação de regressão	R ² (%)
Com Línter	Adsorção	$\Delta S = 6,07^* + (-1,19^*/U_e) + (0,06^*/U_e^2)$	91,66
	Dessorção	$\Delta S = 4,47^* + (1,05^*/U_e) + (0,07^*/U_e^2)$	97,16
Deslintado	Adsorção	$\Delta S = 6,17^* + (-1,24^*/U_e) + (0,07^*/U_e^2)$	93,56
	Dessorção	$\Delta S = 14,19^* + (-2,46^*/U_e) + (0,11^*/U_e^2)$	95,45

Fonte: A autora (2026)

*Significativo a 1% de probabilidade pelo teste “t”.

A validade da teoria da compensação entalpia-entropia para a sorção de água em caroços de algodão com línter e deslintados foi verificada pela linearidade da relação entre o calor isostérico integral e a entropia diferencial, conforme apresentado na Figura 12. Os parâmetros da relação linear, incluindo a temperatura isocinética (T_B), a temperatura média harmônica (T_{hm}), a energia livre de Gibbs isocinética (G_B) e o coeficiente de determinação (R^2), estão indicados na Tabela 18.

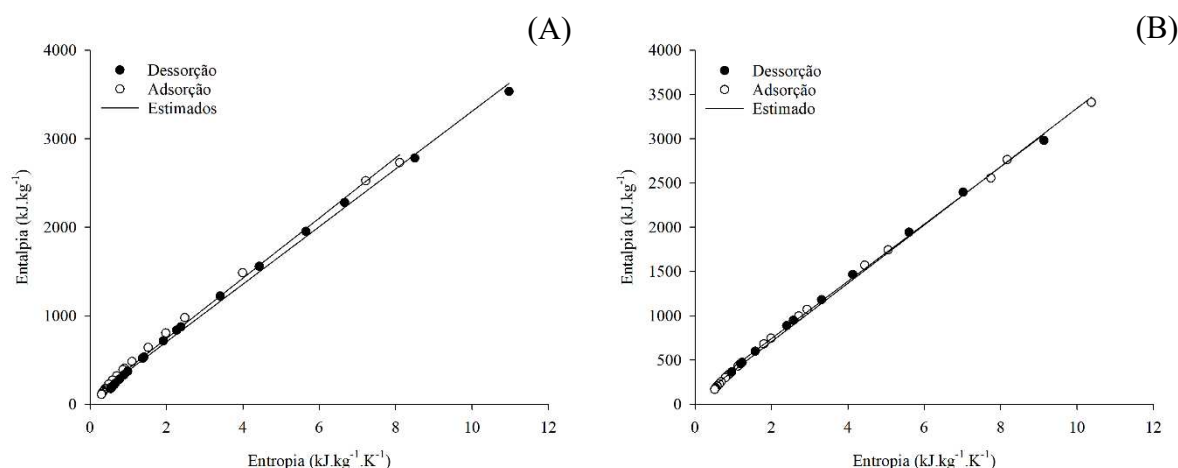


Figura 12. Relação entalpia-entropia em função do teor de água para caroços de algodão com línter (A) e delintados (B).

Tabela 18. Temperatura isocinética (T_B), a temperatura média harmônica (T_{hm}), a energia livre de Gibbs isocinética (G_B) obtidos pela relação entalpia-entropia para caroços de algodão com línter e deslinterados.

Produto	Processo	T_B (K)	T_{hm} (K)	G_B (kJ. kg ⁻¹)	R^2 (%)
Com Línter	Adsorção	339,97	302,49	63,78	99,60
	Dessorção	325,52	302,49	53,85	99,76
Deslinterado	Adsorção	329,67	302,49	47,74	99,84
	Dessorção	323,28	302,49	95,25	99,84

Fonte: A autora (2026).

O primeiro critério para a validação da teoria da compensação entalpia–entropia é a existência de uma forte correlação linear entre entalpia e entropia, a qual é caracterizada por coeficientes de determinação (R^2) superiores a 99% (Sanches et al., 2023). No presente estudo, foram obtidos valores de R^2 de 99,60 e 99,76% para os caroços de algodão com línter nos processos de adsorção e dessorção respectivamente e de 99,84% para ambos os processos para os caroços deslinterados, indicando que as variações de entropia acompanham de maneira linear e consistente as variações de entalpia.

O segundo requisito para confirmar a validade da teoria da compensação entalpia–entropia consiste na comparação entre a temperatura isocinética (T_B) e a temperatura média harmônica (T_{hm}). Quando essas temperaturas apresentam diferença estatisticamente significativa, confirma-se o atendimento do segundo critério necessário para a existência de um padrão de compensação química linear (Sanches et al., 2023; Krug et al., 1976a; Krug et al.,

1976b). As temperaturas isocinéticas determinadas para os processos de adsorção e dessorção dos caroços de algodão com línter foram de 339,97 e 325,52 K, respectivamente, enquanto para os caroços deslinterados os valores obtidos foram de 329,67 e 323,28 K. Observa-se que, para ambos os produtos e em ambos os processos, as temperaturas isocinéticas apresentaram-se superiores à temperatura média harmônica, estimada em 302,49 K, o que significa que o processo é predominantemente controlado pela entalpia. A maioria dos processos de sorção em produtos higroscópicos são controlados pela entalpia, como o feijão-caupi (Karatas; Arslan, 2022), figo (Hssaini et al., 2022) e sementes de mamão (Rosa et al., 2021). Segundo Gabas et al. (2000) quando a sorção de água é controlada pela entalpia, a microestrutura do material mantém-se relativamente estável dentro da faixa de temperatura analisada, não sofrendo alterações significativas ao longo do processo de sorção.

Ao comparar os produtos, nota-se que os caroços com línter apresentaram valores de temperatura isocinética ligeiramente superiores em relação aos deslinterados. Essa diferença sugere que a interação água-sólido na presença das fibras do línter requer um nível energético ligeiramente diferente para provocar a mesma alteração entrópica observada no produto deslinterado.

Os valores de energia livre de Gibbs (G_B) encontrados foram todos positivos, apresentando respectivamente para os processos de adsorção e dessorção médias de 63,78 e 53,85 kJ.kg⁻¹ para os caroços de algodão com línter e de 47,74 e 95,25 kJ.kg⁻¹ para os caroços de algodão deslinterados. O sinal positivo da variação da energia livre de Gibbs na temperatura isocinética indica que o processo de sorção é não-espontâneo, característico de uma reação endotérmica e precisa de energia externa para ocorrer (Goneli et al., 2016). As oleaginosas contêm proteínas predominantemente apolares em sua composição, o que dificulta os mecanismos de sorção de água (Rosa et al., 2021; Machado et al., 2024). Diante do elevado conteúdo de lipídios e proteínas presente nos caroços de algodão, os resultados obtidos reforçam que o processo de sorção não ocorre de forma espontânea.

5 CONCLUSÕES

Com base na análise do equilíbrio higroscópico e das propriedades termodinâmicas dos caroços de algodão com línter e deslinterados, conclui-se que as isotermas de sorção de ambos os produtos apresentaram comportamento característico do Tipo III (formato "J" ou exponencial), comumente encontrado em produtos ricos em lipídios. Dentre os modelos matemáticos avaliados, o modelo Sigma-Copace proporcionou o melhor ajuste aos dados experimentais, sendo o mais indicado para a predição do fenômeno em diferentes temperaturas e atividade de água.

A análise comparativa entre adsorção e dessorção confirmou a existência de histerese em toda a faixa de teor de água estudada, sendo este fenômeno significativamente mais acentuado nos caroços com línter. O processo de deslinteramento, ao remover as fibras e expor o tegumento rígido, reduziu a magnitude da histerese, tornando o ciclo de sorção termodinamicamente mais reversível.

Em relação as propriedades termodinâmicas, o comportamento energético do sistema foi caracterizado por um calor isostérico integral e entropia diferencial que diminuíram com o aumento do teor de água de equilíbrio. A relação linear positiva entre a entalpia e a entropia validou a teoria da compensação isocinética em que a confirmação de que a temperatura isocinética (T_B) foi superior à temperatura média harmônica (T_{hm}) comprova que o processo de sorção é controlado pela entalpia, independentemente da presença do línter. A energia livre de Gibbs apresentou valores positivos nos processos de dessorção e adsorção, evidenciando seu caráter não espontâneo e compatível com processos endotérmicos, os quais demandam energia externa para se desenvolver.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFZAL, Irfan et al. Harvesting and post-harvest management approaches for preserving cottonseed quality. **Industrial crops and products**, v. 155, p. 112842, 2020. [doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112842].

AKAIKE, Hirotugu. A new look at the statistical model identification. **IEEE transactions on automatic control**, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974. [doi: 10.1109/TAC.1974.1100705].

AL-GHOUTI, Mohammad A.; DA'ANA, Dana A. Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. **Journal of hazardous materials**, v. 393, p. 122383, 2020. [doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122383].

ALVES, Tales Prado; FÓZ, Hequel Donizete; NICOLETI, Joel Fernando. Isotermas de desorção de pimentão verde e energia envolvida no processo. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 18, p. 137-145, 2015. [doi: 10.1590/1981-6723.6114].

AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. **Food and bioproducts processing**, v. 80, n. 2, p. 118-128, 2002. [doi: 10.1205/09603080252938753].

AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Water sorption isotherms of starch powders: Part 1: Mathematical description of experimental data. **Journal of food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 297-307, 2004. [doi: 10.1016/S0260-8774(03)00133-X].

ARAÚJO, Adriano Lucena; PENA, Rosinelson da Silva. Moisture desorption behavior and thermodynamic properties of pulp and seed of jambolan (*Syzygium cumini*). **Heliyon**, v. 8, n. 5, 2022. [doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09443].

ARSLAN-TONTUL, Sultan. Moisture sorption isotherm, isosteric heat and adsorption surface area of whole chia seeds. **Lwt**, v. 119, p. 108859, 2020. [doi: 10.1016/j.lwt.2019.108859].

ARSLAN-TONTUL, Sultan. Moisture sorption isotherm and thermodynamic analysis of quinoa grains. **Heat and Mass Transfer**, v. 57, n. 3, p. 543-550, 2021.

AVIARA, Ndubisi A. Moisture sorption isotherms and isotherm model performance evaluation for food and agricultural products. **Sorption in 2020s**, v. 143, 2020.

AZAD, Neda Maftoon et al. Effects of thermodynamic properties of rice and ambient conditions on moisture migration during storage at naturally ventilated warehouses. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 16, n. 7, p. 104761, 2023. [doi: 10.1016/j.arabjc.2023.104761].

BARBOSA-CÁNOVAS, Gustavo V. et al. (Ed.). **Water activity in foods: fundamentals and applications**. John Wiley & Sons, 2020.

BASU, Santanu; SHIVHARE, U. S.; MUJUMDAR, A. S. Models for sorption isotherms for foods: A review. **Drying technology**, v. 24, n. 8, p. 917-930, 2006. [doi: 10.1080/07373930600775979].

BEUCHAT, Larry R. Influence of water activity on growth, metabolic activities and survival of yeasts and molds. **Journal of Food Protection**, v. 46, n. 2, p. 135-141, 1983. [doi: 10.4315/0362-028X-46.2.135].

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

BROOKER, Donald B.; BAKKER-ARKEMA, Fred W.; HALL, Carl W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Springer Science & Business Media, 1992.

BRUNAUER, Stephen; EMMETT, Paul Hugh; TELLER, Edward. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American chemical society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938. [doi: 10.1021/ja01269a023].

BURNHAM, K.P., ANDERSON, D.R. Information and Likelihood Theory: A Basis for Model Selection and Inference. In: Model Selection and Multimodel Inference. **Springer**, New York, NY, 2002. [doi: 10.1007/978-0-387-22456-5_2].

CAMPOS, Renata C. et al. Thermodynamic properties of white bean grains for different equilibrium water contents. **Engenharia Agrícola**, v. 41, p. 379-388, 2021. [doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n3p379-388/2021].

CASSINI, A. S.; MARCZAK, L. D. F.; NOREÑA, C. P. Z. Water adsorption isotherms of texturized soy protein. *Journal of food engineering*, v. 77, n. 1, p. 194-199, 2006. [doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.05.059].

COLLAZOS-ESCOBAR, Gentil A. et al. Thermodynamic analysis and modeling of water vapor adsorption isotherms of roasted specialty coffee (*Coffea arabica* L. cv. Colombia). **LWT**, v. 160, p. 113335, 2022. [doi: 10.1016/j.lwt.2022.113335].

CORRÊA, Paulo Cesar et al. Comparison between desorption isotherm curves of ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) and flax (*Linum usitatissimum* L.) seeds. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, p. e004420, 2020. [doi: 10.1590/1413-7054202044004420].

CORRÊA, Paulo Cesar et al. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010. [doi: 10.1590/S0034-737X2010000500005].

CHEN, Chiachung. Validation of the component model for prediction of moisture sorption isotherms of two herbs and other products. **Foods**, v. 8, n. 6, p. 191, 2019. [doi: 10.3390/foods8060191].

FIGURA, Ludger O.; TEIXEIRA, Arthur A. Water activity. In: **Food physics: Physical properties-measurement and applications**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 1-57.

FERREIRA JUNIOR, Weder N. et al. Isotherms and isosteric heat desorption of *Hymenaea stigonocarpa* Mart. seeds. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 10, p. 504-504, 2018. [doi: 10.5539/jas.v10n10p504].

FERREIRA JUNIOR, Weder N. et al. Modeling and thermodynamic properties of the drying of tamarind (*Tamarindus indica* L.) seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, p. 37-43, 2021. [doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p37-43].

FERREIRA JÚNIOR, Weder N. et al. Use of AIC and BIC in desorption isotherms of tamarind seeds (*Tamarindus indica* L.). **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 4, p. 511-517, 2020. [doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n4p511-517/2020].

FREDRIKSSON, Maria; THYBRING, Emil Engelund. Scanning or desorption isotherms? Characterising sorption hysteresis of wood. **Cellulose**, v. 25, n. 8, p. 4477-4485, 2018. [doi: 10.1007/s10570-018-1898-9].

GABAS, A. L.; MENEGALLI, F. C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption enthalpy-entropy compensation based on isotherms of plum skin and pulp. **Journal of Food Science**, v. 65, n. 4, p. 680-680, 2000. [doi: 10.1111/j.1365-2621.2000.tb16072.x].

GONELI, André LD et al. Moisture sorption isotherms of castor beans. Part 2: Thermodynamic properties. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 757-762, 2016. [doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n8p757-762].

GÖZKE, Gözde. Kinetic and thermodynamic analyses based on thermogravimetric pyrolysis of watermelon seed by isoconversional and master plots methods. **Renewable Energy**, v. 201, p. 916-927, 2022. [doi: 10.1016/j.renene.2022.10.100].

GUO, Li et al. The structure property and adsorption capacity of new enzyme-treated potato and sweet potato starches. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 144, p. 863-873, 2020. [doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.09.164].

GHENNAM, Tarak; BERKOUK, El-Madjid. Back-to-back three-level converter controlled by a novel space-vector hysteresis current control for wind conversion systems. **Electric Power Systems Research**, v. 80, n. 4, p. 444-455, 2010. [doi: 10.1016/j.epsr.2009.10.009].

GHENNAM, Tarak; BERKOUK, El Madjid; FRANCOIS, Bruno. A novel space-vector current control based on circular hysteresis areas of a three-phase neutral-point-clamped inverter. **IEEE**

Transactions on Industrial Electronics, v. 57, n. 8, p. 2669-2678, 2009. [doi: 10.1109/TIE.2009.2035458].

GRIESSEN, Ronald; DAM, Bernard. Simple Accurate Verification of Enthalpy-Entropy Compensation and Isoequilibrium Relationship. **ChemPhysChem**, v. 22, n. 17, p. 1774-1784, 2021. [doi: 10.1002/cphc.202100431].

HAY, Fiona R.; REZAEI, Shabnam; BUITINK, Julia. Seed moisture isotherms, sorption models, and longevity. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 891913, 2022. [doi: 10.3389/fpls.2022.891913].

HSSAINI, Lahcen et al. Hygroscopic proprieties of fig (*Ficus carica* L.): Mathematical modelling of moisture sorption isotherms and isosteric heat kinetics. **South African Journal of Botany**, v. 145, p. 265-274, 2022 [doi: 10.1016/j.sajb.2020.11.026].

IGLESIAS, HÉCTOR A.; CHIRIFE, JORGE. A model for describing the water sorption behavior of foods. **Journal of Food Science**, v. 41, n. 5, p. 984-992, 1976. [doi: 10.1111/j.1365-2621.1976.tb14373.x].

IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. **International journal of food science & technology**, v. 11, n. 2, p. 109-116, 1976. [doi: 10.1111/j.1365-2621.1976.tb00707.x].

IJI, Sunday Ibe; INYANG, Uwem Ekwere; ETUK, Benjamin Reuben. Models for the development of sorption isotherms: A review. **Am. J. Food Sci. Technol**, v. 13, p. 27-37, 2025. [doi: 10.12691/ajfst-13-2-2].

ISQUIERDO, Eder P. et al. Fittings of adsorption isotherm models and thermodynamic properties of urunday seeds. **Engenharia Agrícola**, v. 40, p. 374-380, 2020. [doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n3p374-380/2020].

JAKUES, Lanes Beatriz Acosta et al. Portable-mechanical-sampler system for real-time monitoring and predicting soybean quality in the bulk transport. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, p. 1-12, 2022. [doi: 10.1109/TIM.2022.3204078].

JIDEANI, Victoria A.; MPOTOKWANA, S. M. Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, v. 92, n. 2, p. 182-188, 2009. [doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.10.040].

JIN, Yuqiao et al. Thermal Inactivation of Salmonella Agona in Low–Water Activity Foods: Predictive Models for the Combined Effect of Temperature, Water Activity, and Food Component. **Journal of Food Protection**, v. 81, n. 9, p. 1411-1417, 2018. [doi: 10.4315/0362-028X.JFP-18-041].

JOWITT, R.; WAGSTAFFE, P. J. The Certification of the Water Content of Microcrystalline Cellulose (MCC) at 10 Water Activities: Crm 302. **Office for Official Publications of the European Communities**, 1989.

KAPSALIS, John G. Influences of hysteresis and temperature on moisture sorption isotherms. In: **Water activity**. Routledge, 2017. p. 173-213.

KAPSALIS, John G. Moisture sorption hysteresis. **Water activity: influences on food quality**, p. 143-177, 1981.

KARATAŞ, Mukaddes; ARSLAN, Nurhan. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of cowpea (*Vigna unguiculate* L. Walp) stored in a chamber under controlled humidity and temperature. **Journal of Food Process Engineering**, v. 45, n. 9, p. e14101, 2022. [doi: 10.1111/jfpe.14101].

KUMAR, Manoj et al. Cottonseed oil: extraction, characterization, health benefits, safety profile, and application. **Food Analytical Methods**, v. 16, n. 2, p. 266-280, 2023. [doi: 10.1007/s12161-022-02410-3].

KRUG, R. R.; HUNTER, W. G.; GRIEGER, R. A. Enthalpy-entropy compensation. 1. Some fundamental statistical problems associated with the analysis of van't Hoff and Arrhenius data. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 80, n. 21, p. 2335-2341, 1976a. [doi: 10.1021/j100562a006].

KRUG, R. R.; HUNTER, W. G.; GRIEGER, R. A. Enthalpy-entropy compensation. 2. Separation of the chemical from the statistical effect. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 80, n. 21, p. 2341-2351, 1976b. [doi: 10.1021/j100562a007].

LAGO, Camila Carvalho; LIENDO-CÁRDENAS, Manuel; NOREÑA, Caciano Pelayo Zapata. Thermodynamic sorption properties of potato and sweet potato flakes. **Food and Bioproducts Processing**, v. 91, n. 4, p. 389-395, 2013. [doi: 10.1016/j.fbp.2013.02.005].

LABUZA, Theodore P.; ALTUNAKAR, Bilge. Water activity prediction and moisture sorption isotherms. **Water activity in foods: fundamentals and applications**, p. 161-205, 2020. [doi: 10.1002/9781118765982.ch7].

LEOPOLD, A. Carl; SUN, Wendell Q.; BERNAL-LUGO, Irma. The glassy state in seeds: analysis and function. **Seed Science Research**, v. 4, n. 3, p. 267-274, 1994. [doi: 10.1017/S0960258500002294].

LI, Changyou. Analytical theory study on latent heat coefficient of grain water vaporization. **Drying Technology**, v. 39, n. 6, p. 803-819, 2021. [doi: 10.1080/07373937.2020.1720224].

LUO, Xiao-hong et al. The Hygroscopic Properties and Sorption Isothermic Heat of Coix Seeds. **Food Science and Engineering**, p. 255-270, 2024. [doi: 10.37256/fse.5220244583].

LUNA-FLORES, M. et al. Assessment of moisture adsorption and desorption isotherms, hysteresis phenomenon and thermodynamic analysis of habanero chili (*Capsicum chinense*) powder. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, v. 22, n. 1, p. Alim3044-Alim3044, 2023. [doi: 10.24275/rmiq/Alim3044].

MACHADO, André Luiz Borges et al. Water desorption isotherms and thermodynamic properties of Ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata* Miller). **LWT**, v. 193, p. 115749, 2024. [doi: 10.1016/j.lwt.2024.115749].

MADAMBBA, Ponciano S.; DRISCOLL, Robert H.; BUCKLE, Ken A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of food engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996. [doi: 10.1016/0260-8774(95)00062-3].

MARQUES, Renata Cristina Duarte et al. Modeling sorption properties of maize by-products obtained using the Dynamic Dewpoint Isotherm (DDI) method. **Food Bioscience**, v. 38, p. 100738, 2020. [doi: 10.1016/j.fbio.2020.100738].

MOHAMED, Ait et al. Moisture sorption isotherms and heat of sorption of bitter orange leaves (*Citrus aurantium*). **Journal of food Engineering**, v. 67, n. 4, p. 491-498, 2005. [doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.05.016].

MOREIRA, R. et al. Sorption isotherms of turnip top leaves and stems in the temperature range from 298 to 328 K. **Journal of Food Engineering**, v. 71, n. 2, p. 193-199, 2005. [doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.10.033].

MUALEM, Yechezkel. A conceptual model of hysteresis. **Water resources research**, v. 10, n. 3, p. 514-520, 1974. [doi: 10.1029/WR010i003p00514].

MCMINN, W. A. M.; AL-MUHTASEB, A. H.; MAGEE, T. R. A. Enthalpy–entropy compensation in sorption phenomena of starch materials. **Food Research International**, v. 38, n. 5, p. 505-510, 2005. [doi: 10.1016/j.foodres.2004.11.004].

OJIKI, Onyekwere et al. Moisture Adsorption potentials and energy models of Gongronema latifolium leaves dried in separate environments. **Food Science & Nutrition**, v. 10, n. 2, p. 388-401, 2022. [doi: 10.1002/fsn3.2616].

OLIVEIRA, D. E. C. et al. Isotermas e calor isostérico das sementes de algodão com linter e sem linter. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.15, n. 3, p. 283-292, 2013.

RIZVI, Syed SH. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: **Engineering properties of foods**. CRC Press, 2014. p. 261-348. [doi: 10.1201/9781420028805].

RIZVI, S. S. H.; BENADO, A. L. Thermodynamic analysis of drying foods. **Drying Technology**, v. 2, n. 4, p. 471-502, 1984.

ROSA, Daniele Penteadó et al. Water sorption properties of papaya seeds (*Carica papaya* L.) formosa variety: An assessment under storage and drying conditions. **Lwt**, v. 138, p. 110458, 2021. [doi: 10.1016/j.lwt.2020.110458].

ROSENOW, Phil et al. Numerical modelling of water vapor sorption hysteresis in porous sorbents. **Food Research International**, v. 221, p. 117411, 2025. [doi: 10.1016/j.foodres.2025.117411].

SANCHES, Marcio Augusto Ribeiro et al. Water sorption properties of brewer's spent grain: A study aimed at its stabilization for further conversion into value-added products. **Biomass and Bioenergy**, v. 170, p. 106718, 2023. [doi: doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106718].

SANTOS, S. G. F. et al. Adsorption isotherms and isosteric heat in *Coffea arabica* beans. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, p. e58128, 2020. [doi: https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5058128].

SIK, Hueisheng et al. The influence of drying temperature on the hygroscopicity of rubberwood (*Hevea Brasiliensis*). **Journal of Agricultural Science**, v. 2, n. 1, p. 48, 2010. [doi: 10.5539/jas.v2n1p48].

SILVA, K. S. et al. Sorption isotherms and thermodynamic properties of wheat malt under storage conditions. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 9, p. e13784, 2021. [doi: 10.1111/jfpe.13784].

SORMOLI, Mona Edrisi; LANGRISH, Timothy AG. Moisture sorption isotherms and net isosteric heat of sorption for spray-dried pure orange juice powder. **LWT-Food Science and Technology**, v. 62, n. 1, p. 875-882, 2015. [doi: 10.1016/j.lwt.2014.09.064].

SCHMIDT, Shelly J.; LEE, Joo Won. Comparison between water vapor sorption isotherms obtained using the new dynamic dewpoint isotherm method and those obtained using the

standard saturated salt slurry method. **International Journal of Food Properties**, v. 15, n. 2, p. 236-248, 2012. [doi: 10.1080/10942911003778014].

SCHWARZ, Gideon. Estimating the dimension of a model. **The annals of statistics**, p. 461-464, 1978.

SRIKIATDEN, Jaruk; ROBERTS, John S. Moisture transfer in solid food materials: A review of mechanisms, models, and measurements. **International Journal of food properties**, v. 10, n. 4, p. 739-777, 2007. [doi: 10.1080/10942910601161672].

STATSOFT. **Statistica** (data analysis software system), version 7. Inc. (2004). Disponível em: <www.statsoft.com>. Acesso em 24 abr. 2024.

SYAMALADEVI, Roopesh M. et al. Influence of water activity on thermal resistance of microorganisms in low-moisture foods: a review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, n. 2, p. 353-370, 2016. [doi: 10.1111/1541-4337.12190].

TAO, An et al. Research progress on cottonseed meal as a protein source in pig nutrition: An updated review. **Animal Nutrition**, v. 18, p. 220-233, 2024. [doi: 10.1016/j.aninu.2024.03.020].

TAMILARASAN, C.; JENCY, J. Poornima; JERLIN, R. Thermodynamic properties of seeds: a review. **Agricultural Reviews**, v. 46, n. 3, p. 474-478, 2025. [doi: 10.18805/ag.R-2605].

TAPIA, María S.; ALZAMORA, Stella M.; CHIRIFE, Jorge. Effects of water activity (aw) on microbial stability as a hurdle in food preservation. **Water activity in foods: Fundamentals and applications**, p. 323-355, 2020. [doi: 10.1002/9781118765982.ch14].

TELIS-ROMERO, Javier et al. Enthalpy-entropy compensation based on isotherms of mango. **Food Science and Technology**, v. 25, p. 297-303, 2005. [doi: 10.1590/S0101-20612005000200020].

TEJADA-ORTIGOZA, Viridiana et al. Estimating equilibrium moisture content from relatively short sorption experiments. **LWT**, v. 132, p. 109832, 2020. [doi: 10.1016/j.lwt.2020.109832].

TIWARI, Abhinav; JIAN, Fuji. Desorption and sorption isotherms of different varieties of hemp seeds with different percentages of dockage under different temperatures and different relative humidities. **Agriculture**, v. 13, n. 10, p. 1959, 2023. [doi: 10.3390/agriculture13101959].

VAN DEN BERG, C.; BRUIN, S. **Water activity and its estimation in foods systems: Theoretical aspects**. In: Water activity: Influences on food quality, Rockland LB, Stewart GF (eds.). Academic Press, New York; 1981, p.1-61.

VERTUCCI, Christina W.; LEOPOLD, A. Carl. Bound water in soybean seed and its relation to respiration and imbibitional damage. **Plant Physiology**, v. 75, n. 1, p. 114-117, 1984. [doi: 10.1104/pp.75.1.114].

YILDIRIM, Ali. Moisture diffusivity, hardness, gelatinization temperature, and thermodynamic properties of ultrasound assisted soaking process of cowpea. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 11, p. e13863, 2021. [doi: 10.1111/jfpe.13863].

ZEYMER, Juliana Soares et al. Moisture sorption isotherms and hysteresis of soybean grains. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 45, p. e56615, 2022. [doi: 10.4025/actasciagron.v45i1.56615].

ZEYMER, Juliana Soares et al. Moisture sorption isotherms and hysteresis of soybean grains. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 45, p. e56615, 2023. [doi: 10.4025/actasciagron.v45i1.56615].

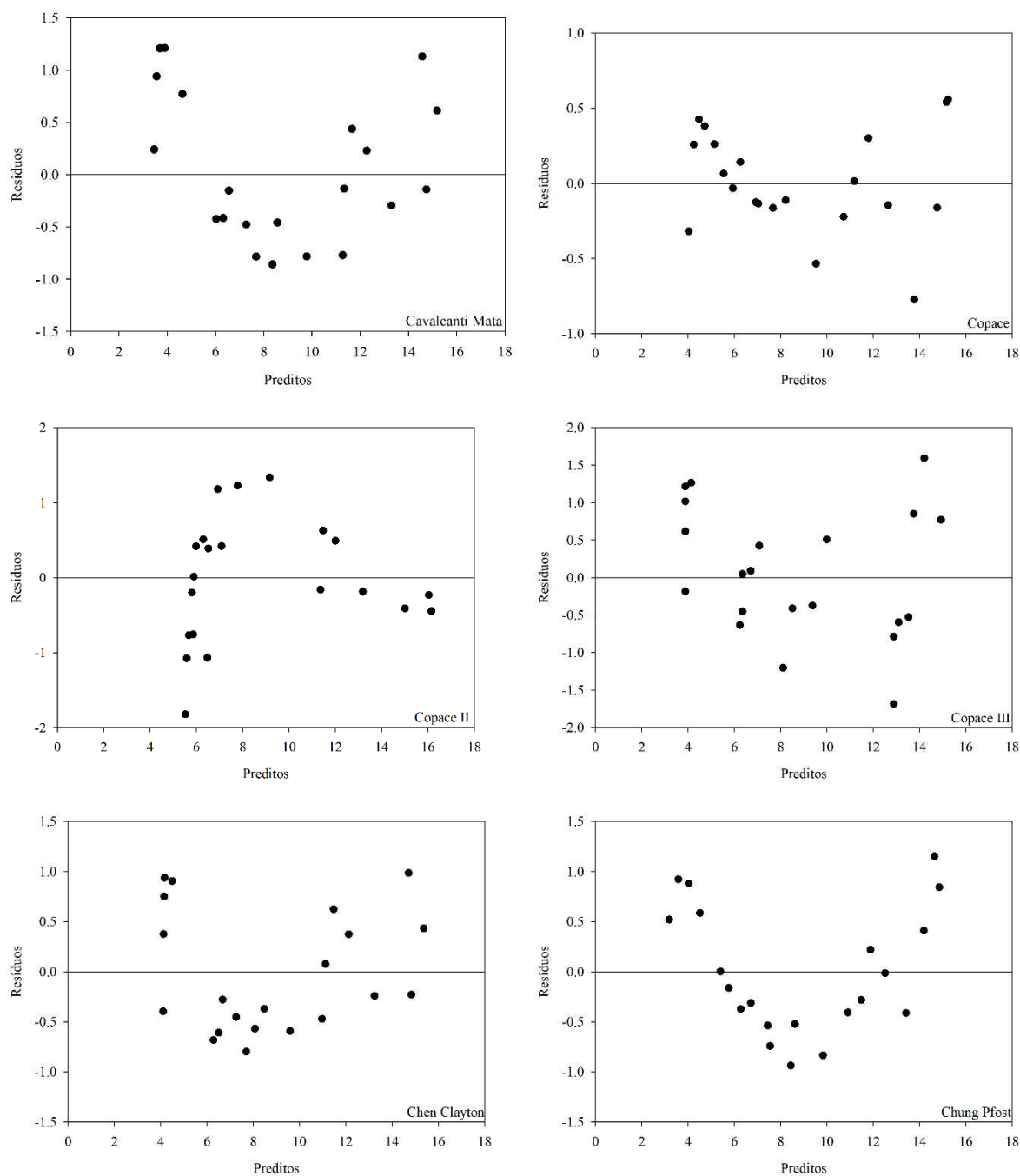
ZEYMER, Juliana Soares et al. Thermodynamic properties of moisture sorption of soybean (*Glycine max* L.) grains. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 47, p. e70140, 2025. [doi: 10.4025/actasciagron.v47i1.70140].

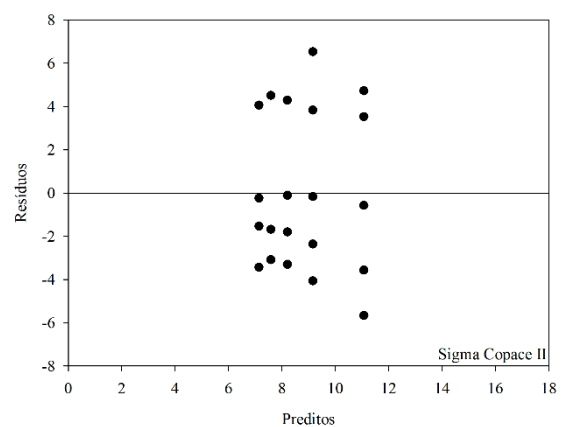
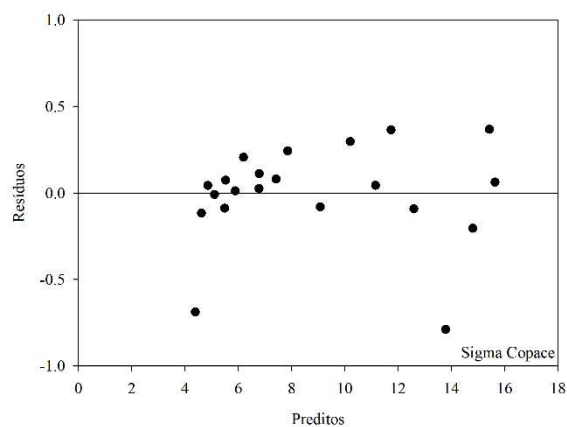
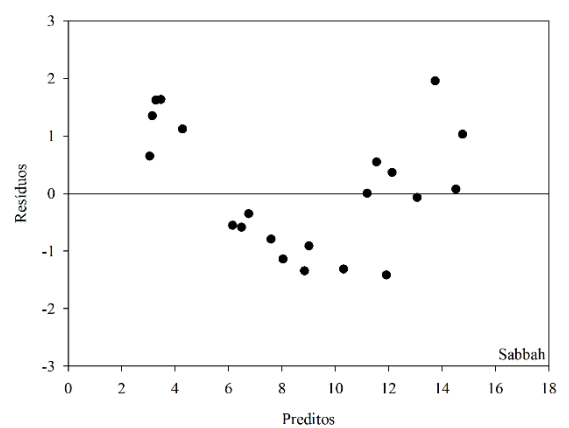
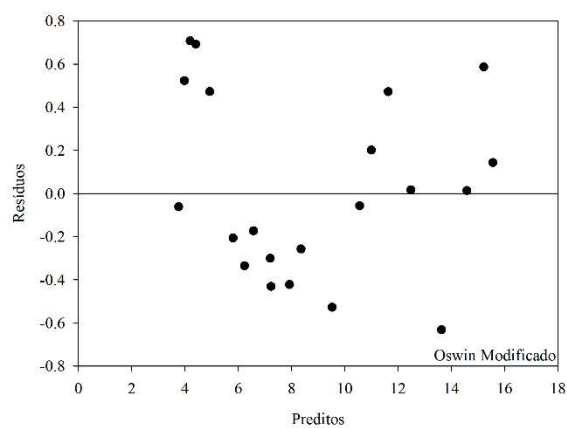
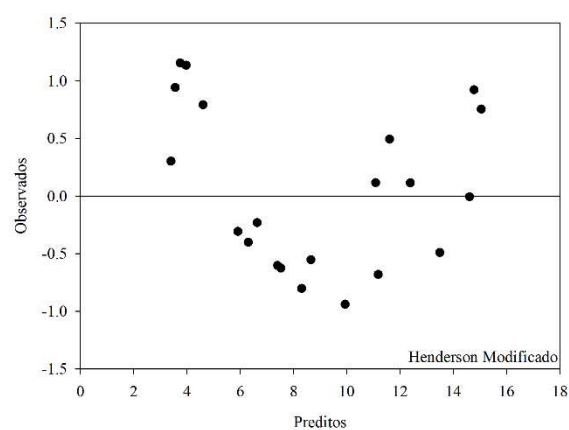
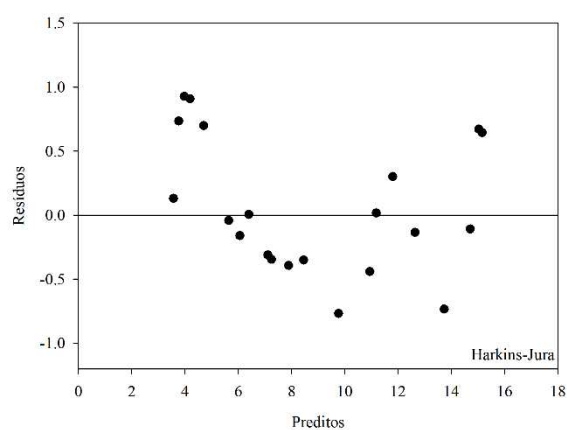
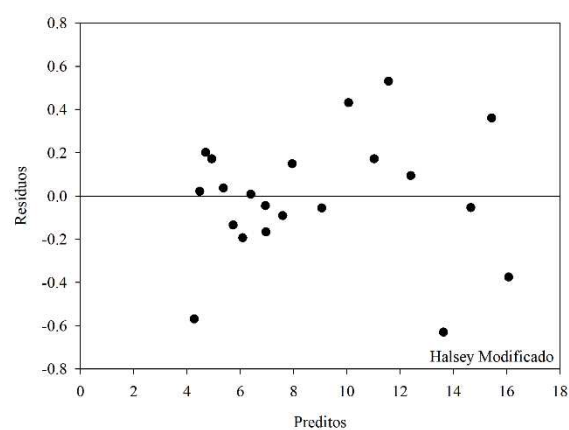
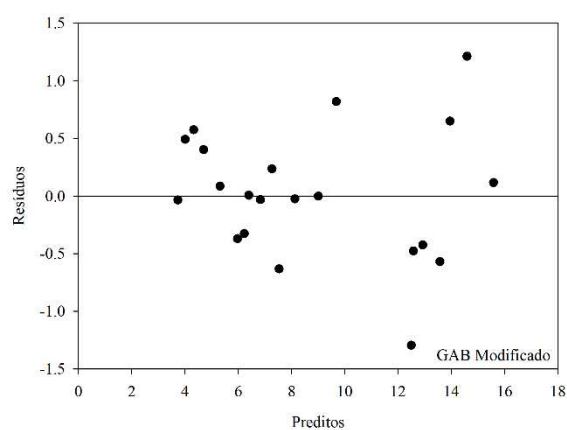
ZHANG, Zhen-Shan et al. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of tiger nuts: An oil-rich tuber. **LWT**, v. 167, p. 113866, 2022. [doi: 10.1016/j.lwt.2022.113866].

ZOU, Yuliang et al. Sorption hysteresis in nanoporous swelling adsorbents. **Physical Review Research**, v. 7, n. 1, p. 013205, 2025. [doi: 10.1103/PhysRevResearch.7.013205].

APÊNDICE A

Distribuição dos resíduos dos modelos matemáticos para caroços de algodão com línter





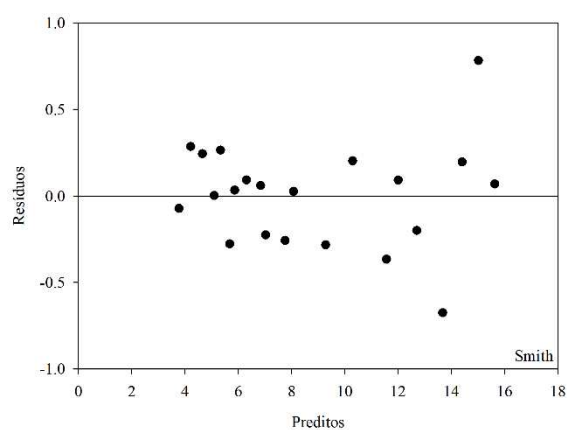
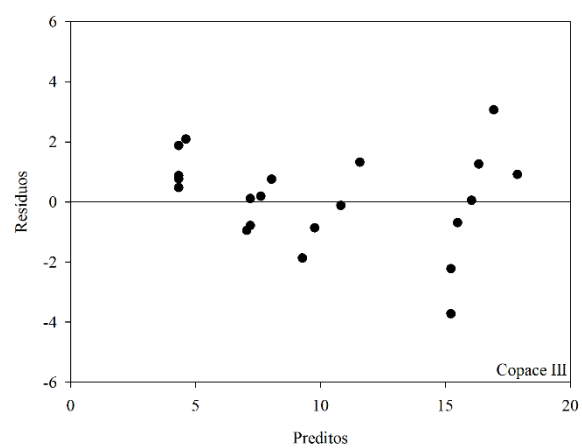
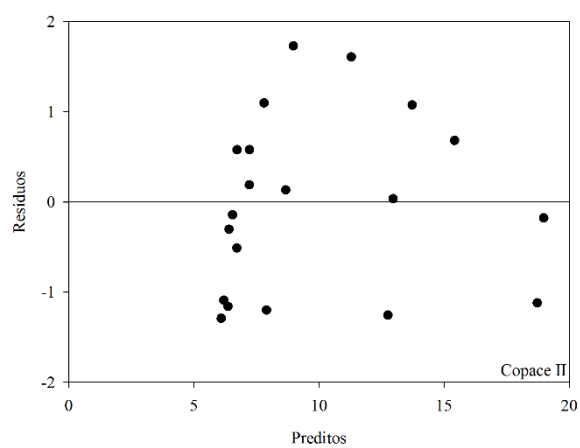
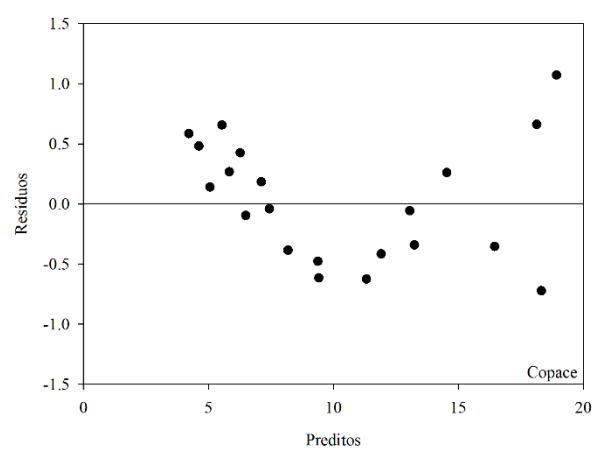
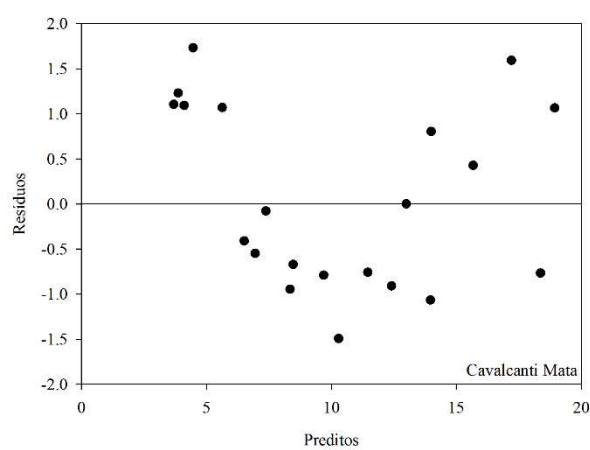
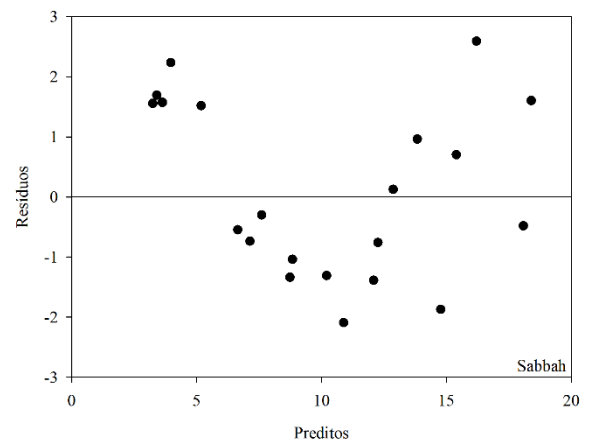
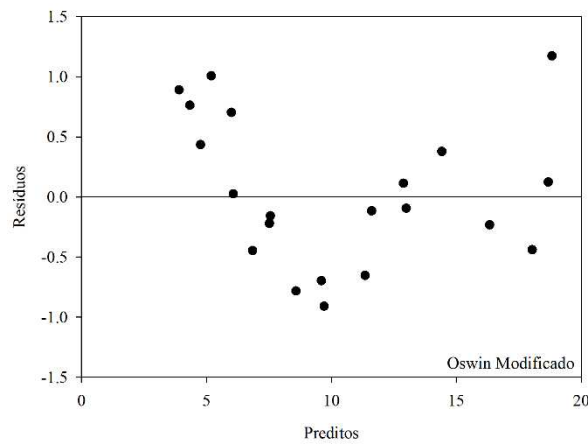
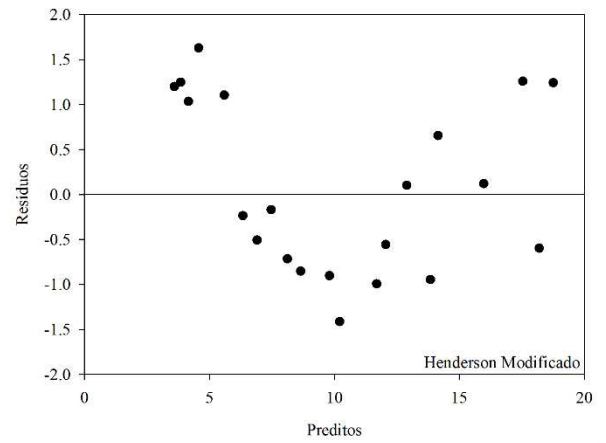
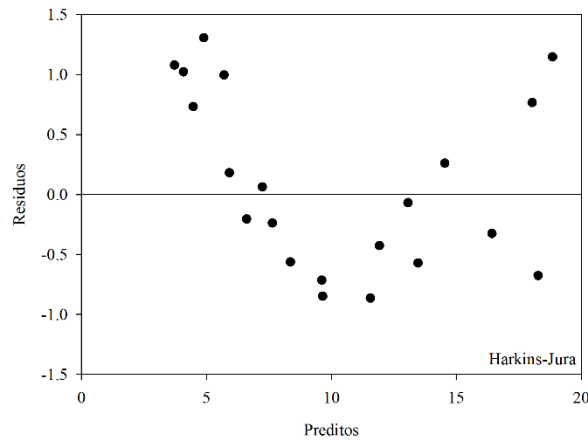
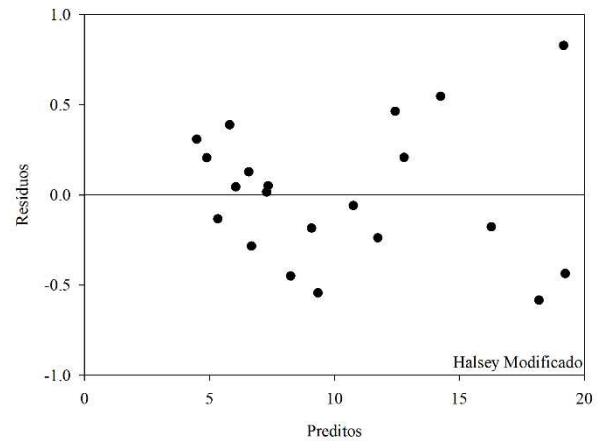
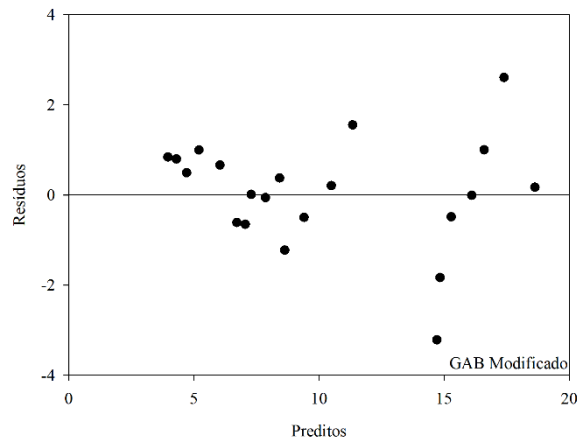
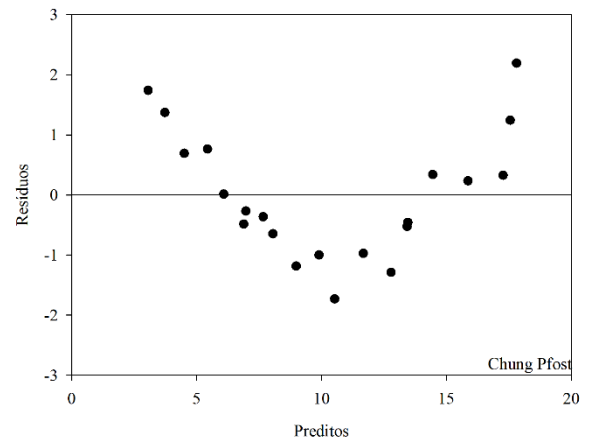
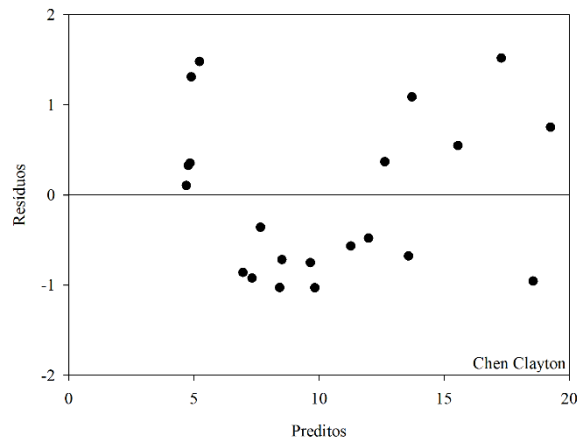


Figura 13. Distribuição dos resíduos dos modelos matemáticos para obtenção do teor de água de equilíbrio de caroços de algodão com linter no processo de adsorção.





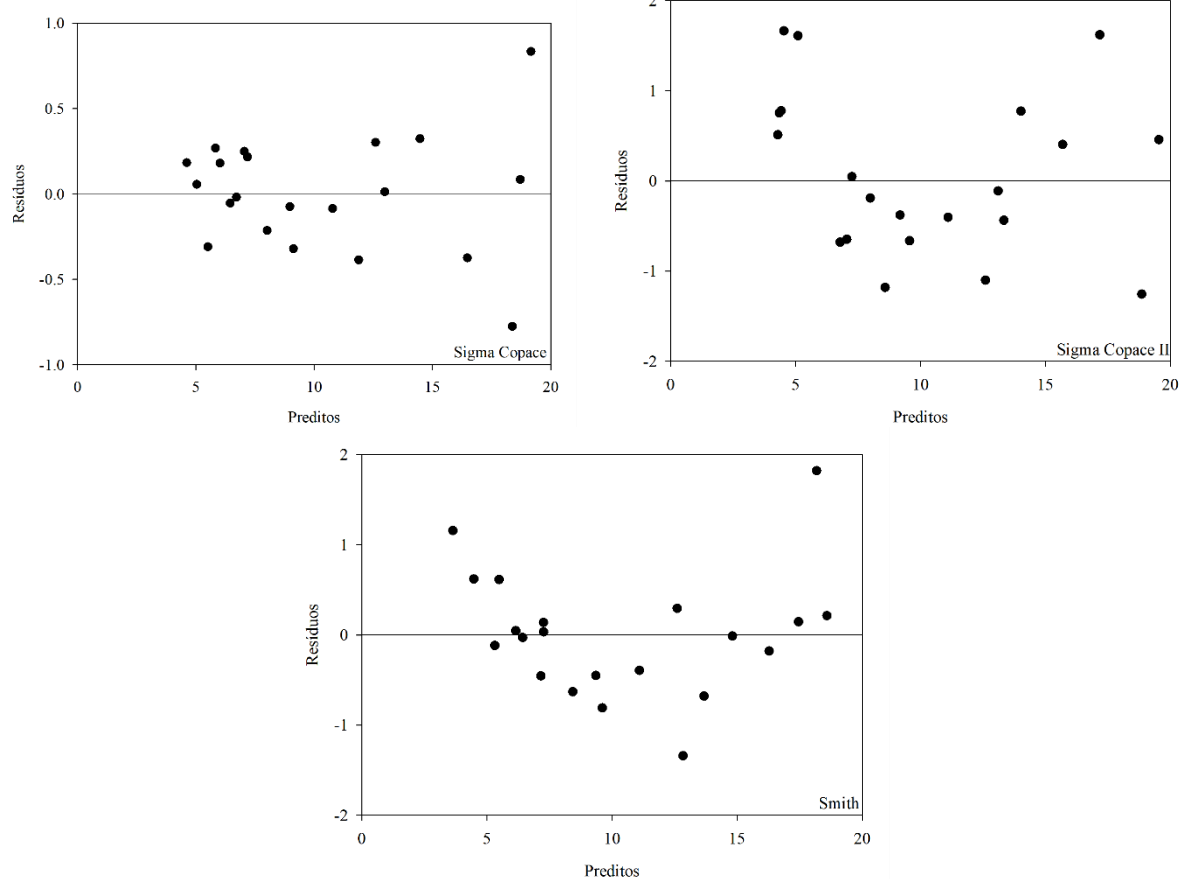
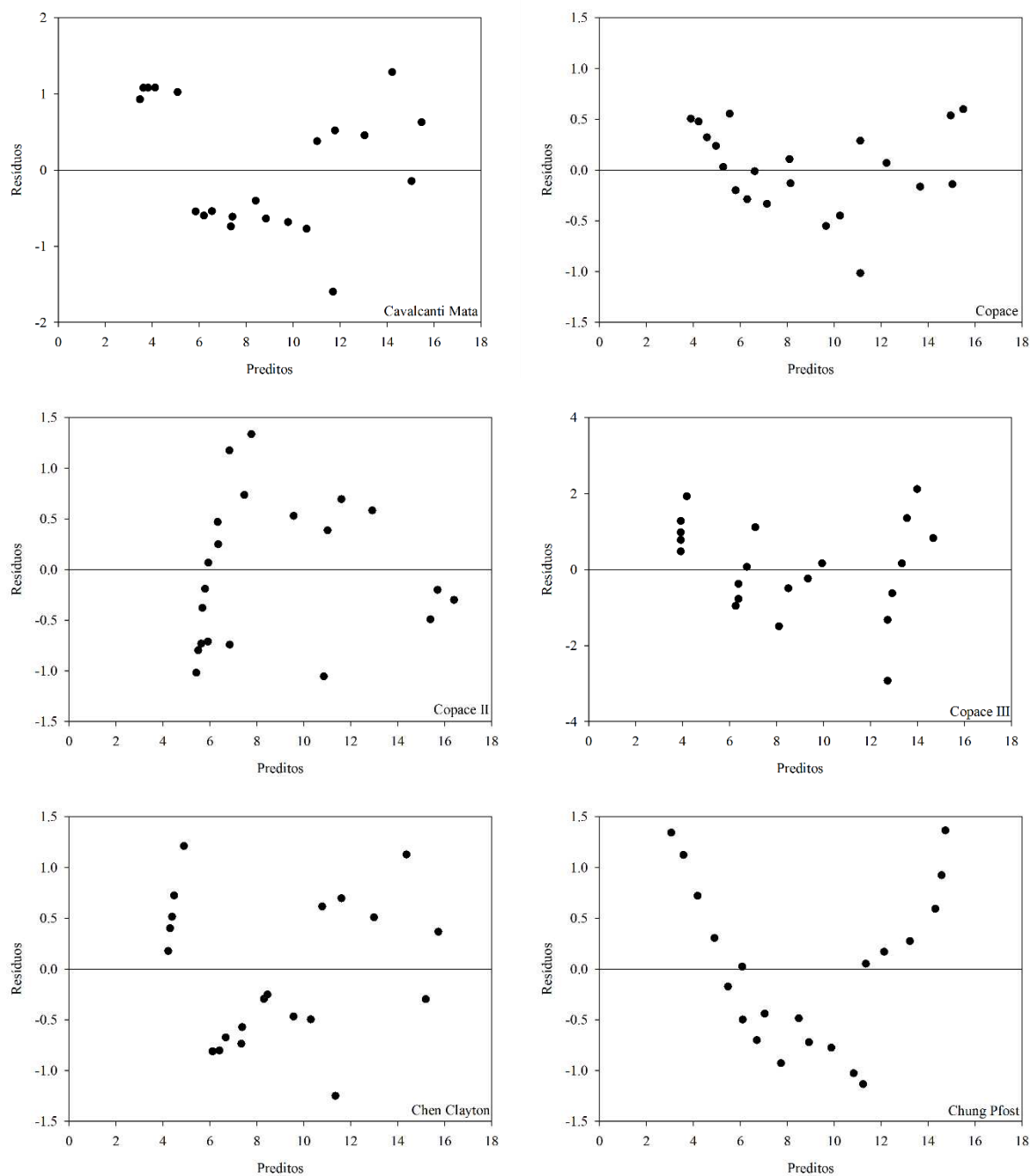
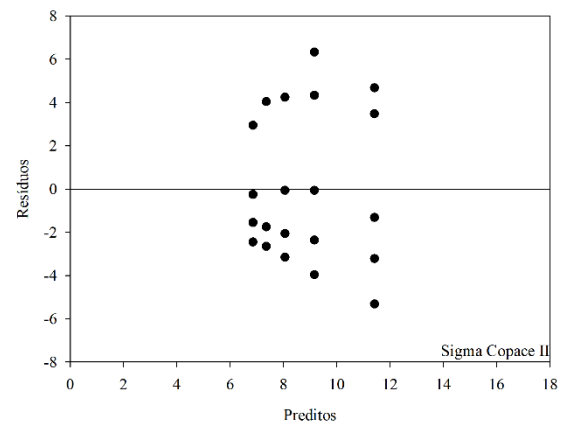
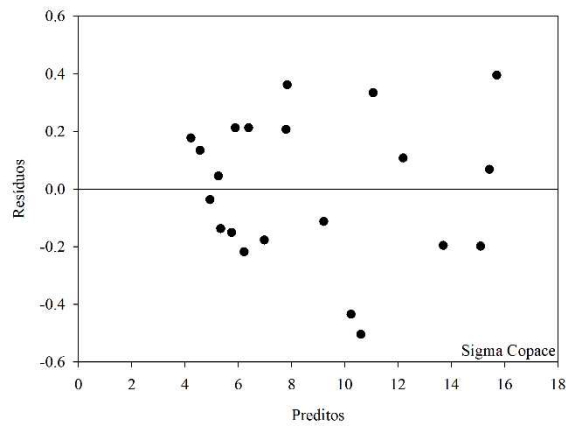
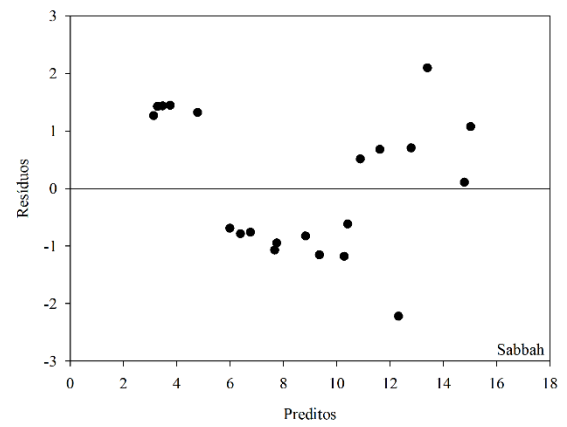
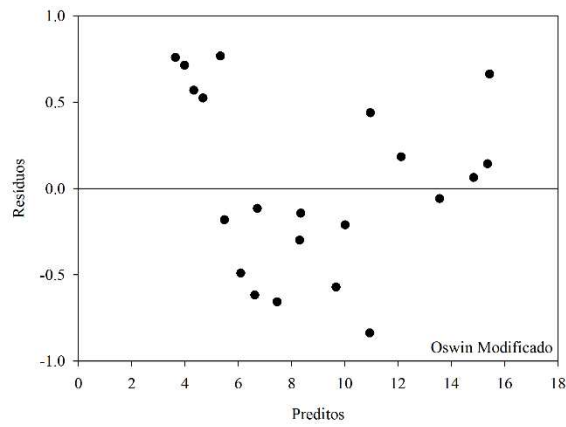
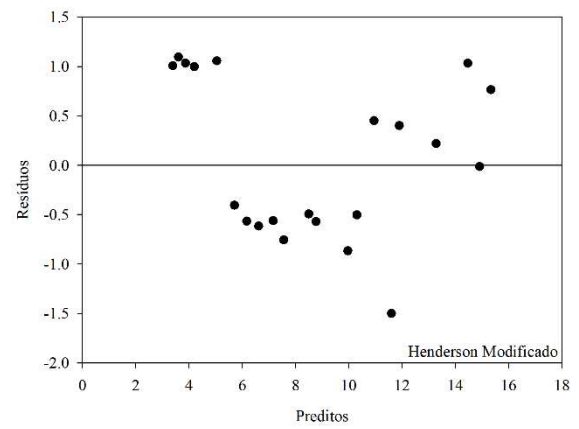
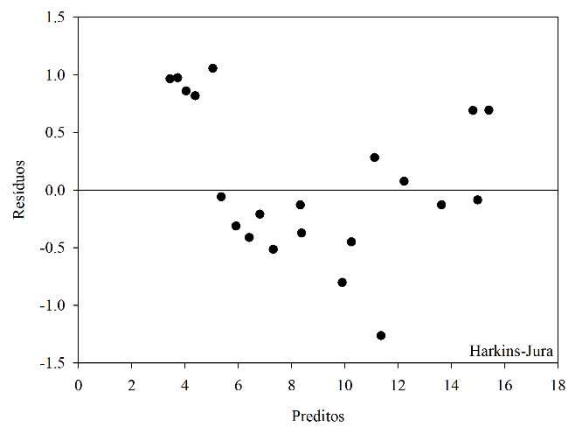
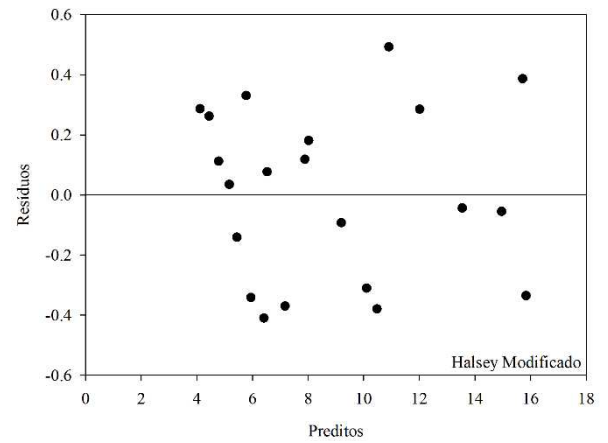
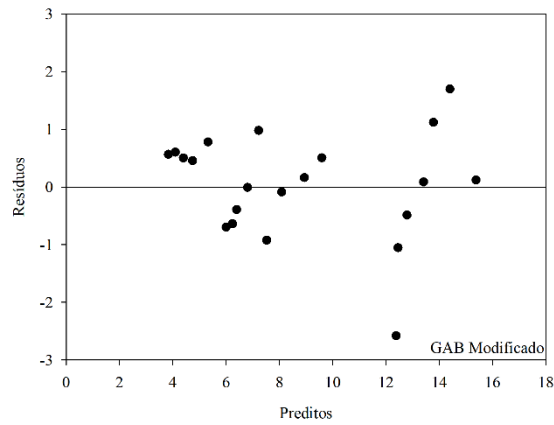


Figura 14. Distribuição dos resíduos dos modelos matemáticos para obtenção do teor de água de equilíbrio de caroços de algodão com línter no processo de dessorção.

APÊNDICE B

Distribuição dos resíduos dos modelos matemáticos para caroços de algodão deslintados





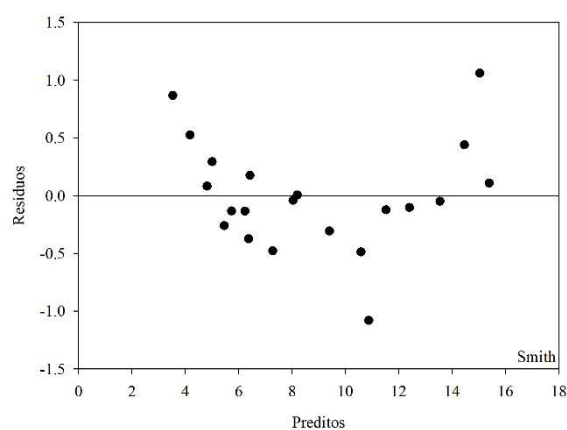
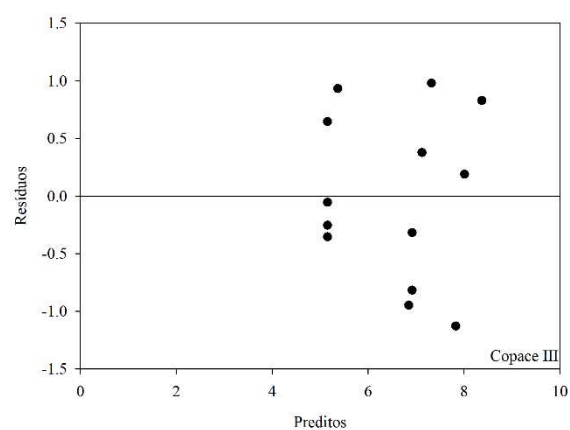
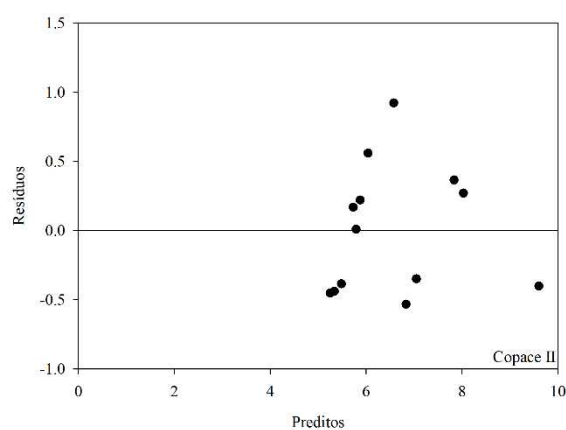
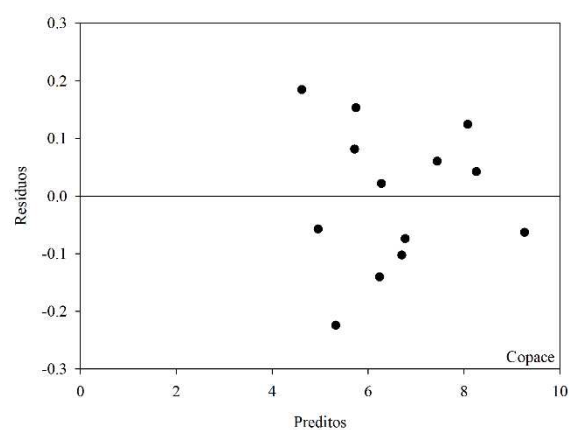
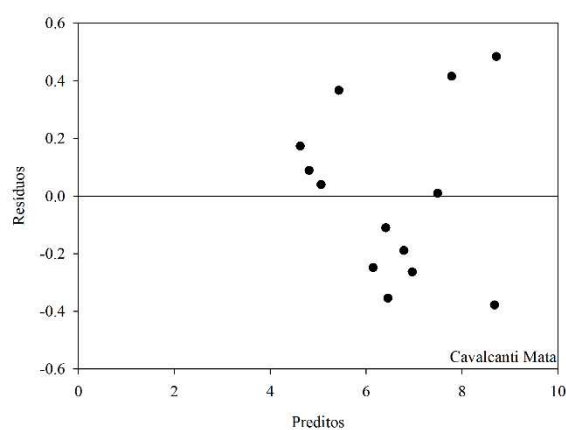
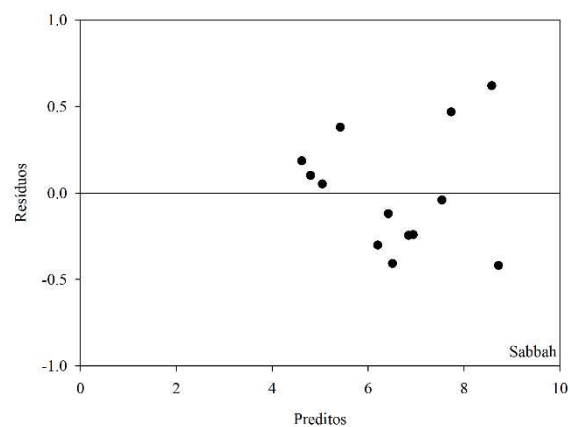
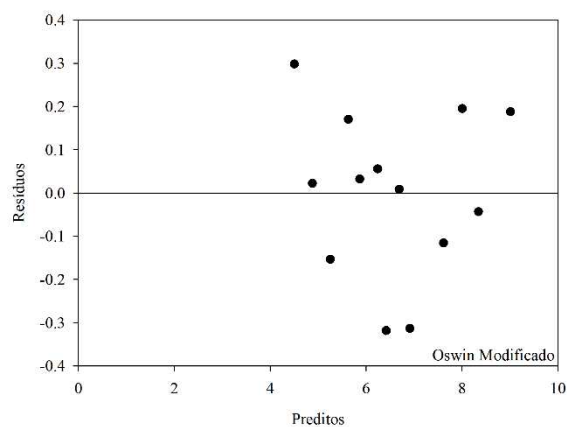
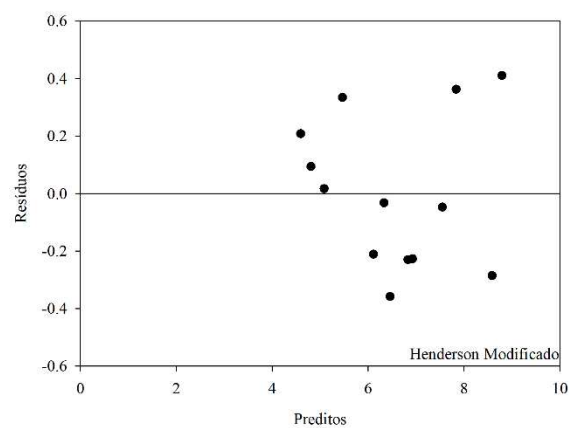
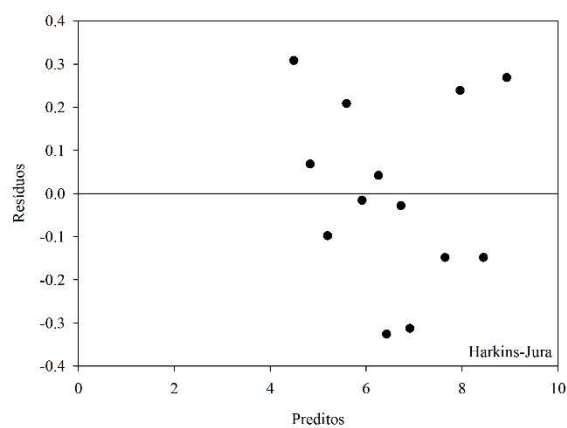
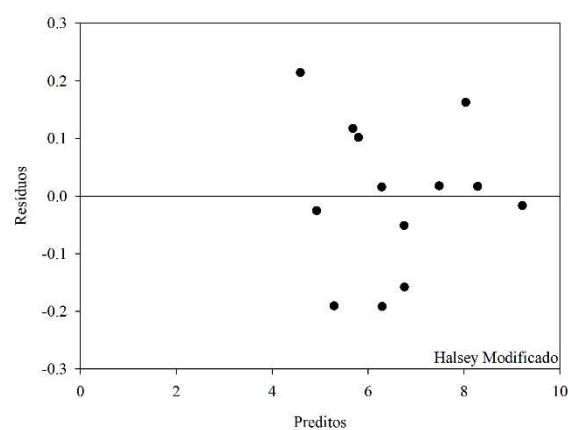
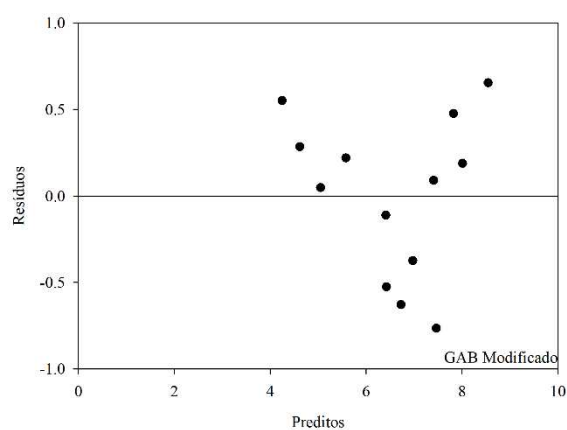
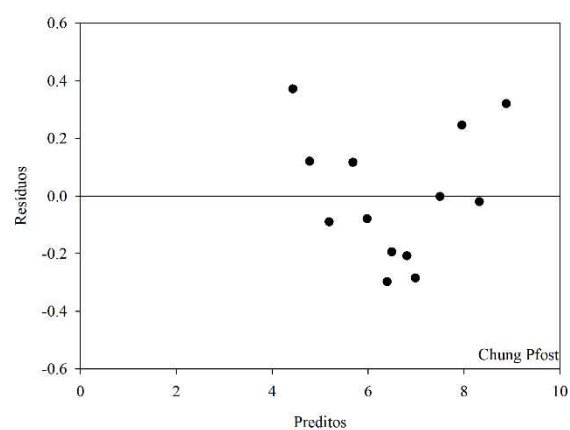
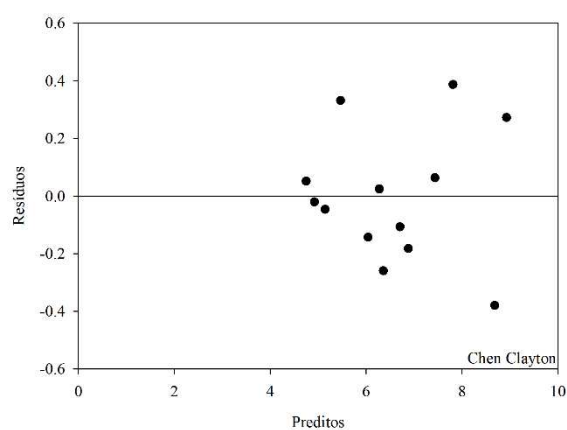


Figura 15. Distribuição dos resíduos dos modelos matemáticos para obtenção do teor de água de equilíbrio de caroços de algodão deslintados no processo de adsorção.





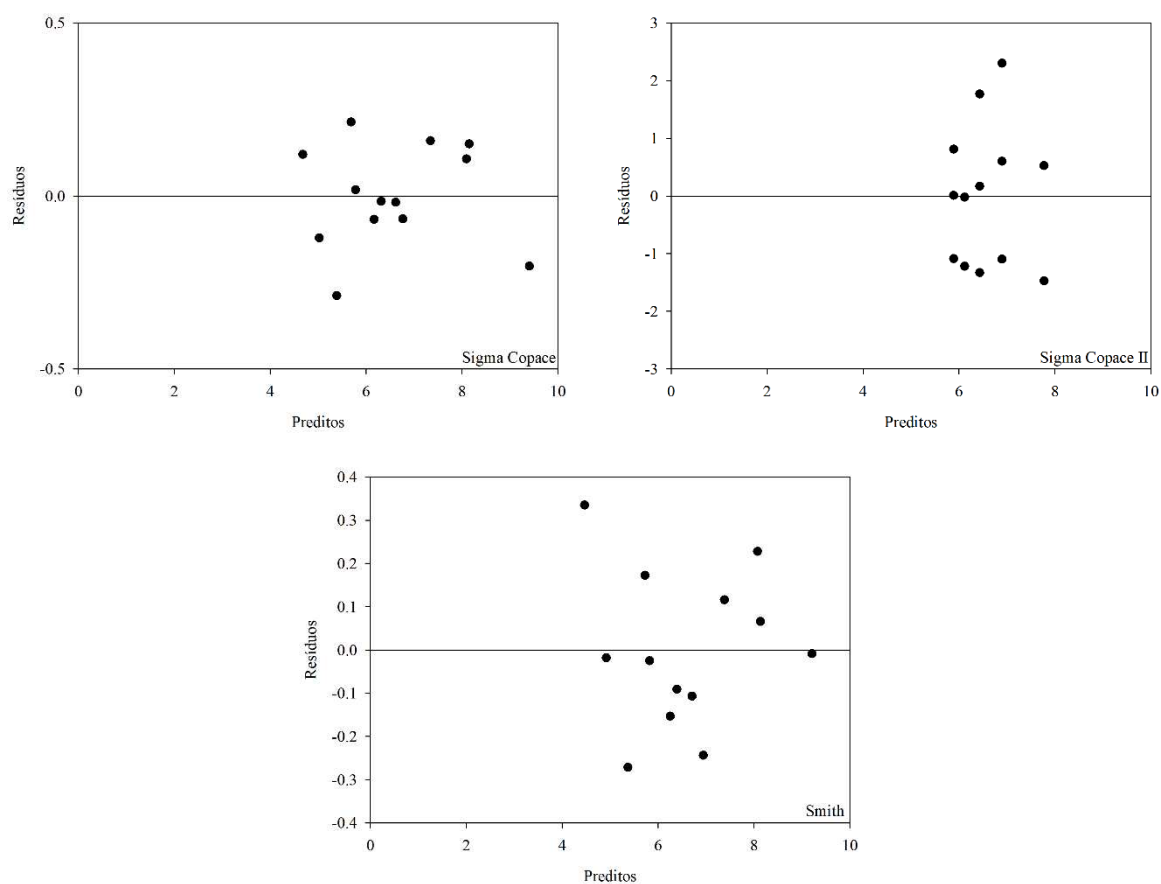


Figura 16. Distribuição dos resíduos dos modelos matemáticos para obtenção do teor de água de equilíbrio de caroços de algodão deslintados no processo de dessorção.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM DA RESISTÊNCIA AO FLUXO DE AR EM CAROÇOS DE ALGODÃO

RESUMO

A resistência ao fluxo de ar em colunas de grãos é um parâmetro essencial para o adequado dimensionamento de sistemas de secagem e aeração na pós-colheita de produtos agrícolas. Neste estudo, analisou-se a resistência ao fluxo de ar em colunas de caroços de algodão com línter e deslntados, com o objetivo de fornecer subsídios para o dimensionamento e otimização operacional de sistemas de secagem e aeração. A queda de pressão foi determinada experimentalmente com diferentes fluxos de ar ao longo da profundidade do leito, visando avaliar o desempenho de distintos modelos matemáticos no ajuste aos dados experimentais. Os resultados indicaram que a queda de pressão estática apresentou um comportamento linear em função da altura da coluna de produto e de forma não linear em relação ao fluxo de ar. Os caroços de algodão com línter apresentaram maiores gradientes de pressão em comparação aos deslntados, evidenciando maior resistência ao escoamento, o que está associado à maior rugosidade superficial e à redução do tamanho dos poros intergranulares. Entre os modelos avaliados, o modelo de Shedd foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais para ambos os produtos, representando adequadamente a perda de carga nas faixas de fluxo de ar estudadas.

Palavras-chave: Aeração, Perda de carga, Modelagem matemática, Pós-colheita, Shedd.

1 INTRODUÇÃO

Os processos de secagem e aeração são amplamente empregados em diversos setores industriais, inclusive para o processamento e armazenamento de produtos agrícolas. No contexto da pós-colheita, essas técnicas são fundamentais para a preservação da qualidade física, química, fisiológica e nutricional, bem como para minimização das perdas quantitativas e qualitativas ao longo do armazenamento (Sadeghizadeh et al., 2025).

Entre as operações de pós-colheita, os processos de secagem e aeração desempenham papel fundamental na redução do teor de água a níveis seguros para o armazenamento e no controle das condições do ecossistema de armazenagem e das atividades microbiológicas da massa de grão, fatores que influenciam diretamente na atividade respiratória e no desenvolvimento de insetos e microrganismos (Panigrahi et al., 2020). Durante esses processos, o ar ambiente é impulsionado por ventiladores a atravessar a massa de grãos, que se comporta como um meio poroso. À medida que o ar escoar, ocorrem interações entre o fluido e a superfície das partículas, originando forças de arrasto que se manifestam como resistência ao escoamento e resultam em queda de pressão, representando a perda de energia do ar ao longo do percurso. Quando a resistência imposta pela coluna de produto supera a pressão disponibilizada pelo ventilador, ocorre a redução do fluxo de ar, tornando-o insuficiente para atravessar o material, o que compromete a eficiência dos processos de secagem e aeração. Dessa forma, determinar a perda de carga em sistemas de secagem e aeração e a escolha do ventilador apropriado requer, de maneira criteriosa, o conhecimento da intensidade da resistência imposta pelo fluxo de ar (Sadeghizadeh et al., 2025). A eficiência desses processos está diretamente relacionada à capacidade de promover o escoamento adequado do ar através da massa granular, o que depende da resistência ao fluxo de ar imposta pelo leito formado pelos grãos. Portanto, o conhecimento do comportamento da perda de carga em função das condições operacionais e das características físicas do produto torna-se indispensável para o dimensionamento e a otimização de sistemas de secagem e aeração.

A resistência ao fluxo de ar em materiais granulares é influenciada por diversos fatores, como tamanho, forma e rugosidade das partículas, porosidade do leito, profundidade da coluna de grãos, presença de impurezas e materiais estranhos, teor de água do produto e do fluxo de ar empregado (Razavizadeh et al., 2023). No caso dos caroços de algodão, a presença do línter modifica significativamente a estrutura do leito granular, alterando a porosidade efetiva, a espessura dos canais de escoamento e o coeficiente de atrito ao escoamento do ar. Essas

particularidades tornam o comportamento dos caroços de algodão distinto dos observados em outros grãos tradicionalmente estudados, como milho, soja e trigo.

A modelagem da resistência ao fluxo de ar constitui uma ferramenta essencial para a previsão da perda de carga em colunas de grãos, permitindo a seleção adequada de ventiladores, a estimativa do consumo energético, definição de condições operacionais mais eficientes e manejo adequados dos sistemas de secagem e aeração (Carrillo et al., 2024). Para isso, diversos modelos empíricos e semiempíricos encontram-se descritos em literaturas técnicas com o objetivo de descrever o escoamento de ar em meios porosos.

Apesar da ampla aplicação desses modelos, observa-se uma escassez de estudos específicos voltados à caracterização e modelagem da resistência ao fluxo de ar em leitos de caroços de algodão com línter e deslintados. Essa lacuna limita o adequado dimensionamento de sistemas de secagem e aeração destinados a esses produtos, podendo resultar em ineficiências energéticas e operacionais. Além disso, as estruturas de armazenagem de caroços de algodão, em geral, não dispõem de sistemas de aeração, em parte devido à limitada disponibilidade de informações sobre propriedades como a resistência ao fluxo de ar. Essa deficiência dificulta a conservação segura do produto durante o armazenamento, favorecendo a ocorrência de deterioração e perdas de qualidade.

Diante desse contexto, o presente trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar e modelar a resistência ao fluxo de ar em leitos de caroços de algodão com línter e deslintados, por meio da análise experimental da queda de pressão em função da altura do leito e do fluxo de ar. Adicionalmente, ajustar e comparar diferentes modelos matemáticos para a descrição do fenômeno, identificando aquele que melhor representa o comportamento dos produtos nas condições estudadas, contribuindo para o aprimoramento do desenvolvimento de projetos e operação de sistemas empregados na pós-colheita dos caroços de algodão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Resistência ao fluxo de ar

As perdas de grãos e sementes no período pós-colheita representam um dos principais desafios do armazenamento agrícola, caracterizado pela redução de massa, degradação da qualidade física e nutricional e perda de viabilidade germinativa. Estima-se que as perdas globais de grãos durante o armazenamento variam entre 7% e 15%, sendo uma parcela significativa atribuída a práticas inadequadas de beneficiamento e processamento (Razavizadeh et al., 2023; Sugri et al., 2021).

A deterioração de grãos e sementes armazenados está associada, principalmente, à ação de insetos e microrganismos e das condições climáticas de armazenagem. As atividades metabólicas desses organismos elevam a temperatura e o teor de água da massa armazenada, favorecendo a migração de umidade e a formação de regiões localizadas de aquecimento. Nessas condições, intensifica-se o crescimento de fungos, ácaros e insetos, acelerando a perda de qualidade dos grãos (Srivastava; Mishra, 2021; Lawrence et al., 2013; Manandhar et al., 2018).

A aeração é uma das principais estratégias para minimizar variações térmicas e higroscópicas no armazenamento de grãos. Quando corretamente dimensionado e operado, o sistema de aeração permite a redução gradual da temperatura da massa armazenada, contribuindo para a manutenção da qualidade e para a segurança do armazenamento (Olatunde et al., 2016; Coradi et al., 2020). O estudo da aeração em massas de grãos fundamenta-se na teoria do escoamento de fluidos através de meios porosos. Uma massa de grãos armazenada é caracterizada como uma matriz sólida (os grãos) permeada por uma rede de espaços vazios interconectados (poros), através dos quais o ar deve fluir (Jian; Jayas, 2024; Brooker et al., 1992).

Um aspecto fundamental no escoamento de ar forçado em meios porosos é a perda de carga, a qual resulta diretamente da resistência ao fluxo de ar. A resistência imposta a esse fluxo é resultado da interação complexa entre as propriedades físicas do fluido como a viscosidade e massa específica do ar e a geometria do meio poroso, que envolve características da massa de grãos como forma e tamanho, diâmetro dos poros, rugosidade superficial e a presença de impurezas (Kurpaska et al., 2020; Agullo; Marenia, 2005). Quando o ar forçado é conduzido através de materiais porosos, seu escoamento ocorre por trajetórias sinuosas ao longo dos vazios existentes entre as partículas do leito, o que provoca dissipação de energia. Esse comportamento

decorre, principalmente, do atrito entre o fluido e a superfície dos grãos, bem como das interações viscosas entre as próprias moléculas de ar ao atravessarem os poros do material. A combinação do atrito superficial e das constantes mudanças na direção do escoamento resulta em perdas de energia, expressas na forma de queda de pressão por unidade de profundidade do leito, parâmetro denominada resistência ao fluxo de ar (Jian; Jayas, 2024; Ramaj et al., 2022).

A resistência ao fluxo de ar tem sido amplamente investigada no contexto do pré-processamento e do armazenamento de produtos agrícolas, uma vez que influencia diretamente o comportamento do escoamento do ar e a demanda energética dos sistemas de ventilação. A compreensão adequada da queda de pressão é, portanto, fundamental para o dimensionamento eficiente de sistemas de secagem e aeração, assegurando que o ar atravesse a massa de grãos de maneira uniforme. Projetos de ventilação inadequados ou estimativas imprecisas da resistência ao fluxo de ar, podem resultar em estratégias de aeração ineficientes, favorecendo a formação de zonas com baixa velocidade do ar, propícias ao desenvolvimento fúngico, ou regiões com fluxo excessivo, que levam à redução indesejada do teor de água dos grãos, comprometendo a qualidade do produto (Goneli et al., 2020).

2.2 Fatores que influenciam a resistência ao fluxo de ar

A resistência ao fluxo de ar em massas de grãos é um fenômeno múltiplo, resultante da interação entre as propriedades físicas do material armazenado e as condições operacionais dos sistemas de aeração ou secagem. A compreensão dos fatores que governam a perda de carga é essencial para o dimensionamento adequado de sistemas de ventilação e para a previsão do comportamento do escoamento do ar em meios porosos agrícolas. Essa resistência é influenciada por diversos aspectos, como a presença de impurezas, o teor de água dos grãos, a configuração dos dutos, a porosidade da massa armazenada e as características geométricas e superficiais das partículas, incluindo tamanho, forma e rugosidade. Além disso, a profundidade da coluna de grãos, o método de enchimento do silo e a direção do escoamento do ar exercem influência significativa sobre a magnitude da queda de pressão no sistema (Razavidadeh et al., 2025; Jian; Jayas, 2024).

A presença de impurezas na massa de grãos altera a resistência ao fluxo de ar, principalmente por modificar a estrutura porosa do leito. Partículas finas tendem a ocupar os espaços vazios entre os grãos, reduzindo a porosidade e aumentando a massa específica aparente, o que resulta em maior queda de pressão durante o escoamento do ar (Górnicki, Kaleta, 2015a). O aumento da fração de finos promove o aumento da perda de carga em

diferentes produtos agrícolas. Em contrapartida, a presença de impurezas de maior dimensão, como palha, pode aumentar a macroporosidade do leito e reduzir a resistência ao fluxo de ar, dependendo da sua fração e da taxa de escoamento aplicada. Dessa forma, o tipo, o tamanho e a proporção das impurezas presentes na massa armazenada são fatores determinantes na magnitude da perda de carga em sistemas de aeração e secagem.

Grãos armazenados a granel em estruturas de grande porte apresentam uma estrutura porosa altamente complexa, formada por muitos poros com distintas dimensões, geometrias e graus de conectividade. A compactação induzida pelo peso próprio da massa armazenada altera essa estrutura ao longo da profundidade do leito, modificando o padrão de escoamento do ar e aumentando a queda de pressão ao longo da coluna de grãos (Khatchatourian; Savicki, 2004). Durante o armazenamento, a compressão progressiva das camadas inferiores favorece a formação de poros de menor diâmetro, especialmente nas regiões próximas à base do silo. Dessa forma, diferentes níveis da massa granular estão sujeitos a graus distintos de compactação, fazendo com que os canais de escoamento do ar se tornem progressivamente mais estreitos com o aumento da profundidade do leito. Leitos com maior porosidade apresentam canais mais amplos e mais conectados, o que facilita a passagem do ar e resulta em menores valores de queda de pressão para uma mesma vazão. Em contrapartida, a redução da porosidade, decorrente da compactação ou presença de impurezas, promove o estreitamento dos poros e o aumento da tortuosidade dos caminhos de escoamento, elevando o atrito fluido-partícula e a dissipação de energia. Além disso, a porosidade exerce influência direta sobre o regime de escoamento do ar no interior do leito, afetando a transição entre os regimes laminar e turbulento (Ramaj et al., 2022; Nwaizu; Zhang, 2021; Rocha et al., 2020).

O teor de água também exerce influência sobre a resistência ao fluxo de ar em massas de grãos, uma vez que afeta diretamente as propriedades físicas do material e a estrutura do leito poroso. O aumento do teor de água tende a promover a expansão dos grãos e alterações na forma e tamanho desses, modificando a porosidade e o diâmetro efetivo dos canais de escoamento. A relação entre teor de água e porosidade intergranular não é universal, variando conforme as características estruturais e morfológicas de cada produto agrícola. Em geral, para um mesmo produto, grãos com maior teor de água apresentam maior porosidade intergranular, o que resulta em menor resistência ao fluxo de ar e, conseqüentemente, em menores valores de queda de pressão para uma mesma profundidade do leito. Além disso, o teor de água influencia as interações de atrito entre as partículas e entre o fluido e a superfície dos grãos, podendo alterar o regime de escoamento do ar (Agullo; Marenia, 2005; Mohsenin, 1986; Brooker et al., 1992).

2.3 Modelos matemáticos

Diferentes modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos foram desenvolvidos para mensurar a queda de pressão do fluxo de ar, dentre eles o modelo de Ergun, Shedd e Hukill e Ives, além de modelos estatísticos, estão entre os mais aplicados. Inicialmente, o modelo de Ergun foi criado para leitos de esféricos com tamanhos uniformes, levando em conta velocidade linear e quadrática que dependiam da porosidade do leito, diâmetros das partículas e propriedades do fluido. As equações alternativas, como de Shedd, Hukill e Ives são de natureza puramente empírica, mas são eficazes para diversos conjuntos de dados experimentais (Górnicki et al., 2015b).

A equação de Ergun é um modelo amplamente utilizado para descrever a perda de carga decorrente do escoamento de fluidos através de meios porosos, como leitos fixos de partículas. Proposta por Ergun (1952), a equação integra contribuições associadas aos regimes laminar e turbulento, permitindo estimar a queda de pressão por unidade de comprimento do leito em função das propriedades do fluido e das características físicas do material particulado (Kuptz; Hartmann, 2021; Ramaj et al., 2022). De forma geral, a equação relaciona a queda de pressão ao longo do leito com a viscosidade (μ) e a massa específica do fluido (ρ), o fluxo de escoamento (V), o diâmetro médio das partículas (d) e a porosidade do meio (ϵ). O primeiro termo da equação representa as perdas de energia por efeitos viscosos, predominantes em regime laminar, enquanto o segundo termo está associado às perdas inerciais, mais relevantes em condições de escoamento turbulento. Assim, a equação de Ergun pode ser aplicada em uma ampla faixa de velocidades, cobrindo a transição entre regimes (Kuptz; Hartmann, 2021; Górnicki et al., 2015b; Yazdanpanah et al., 2011). Hunter (1983) e Giner e Denisienia (1996) propuseram adaptações ao modelo de Ergun, partindo do pressuposto de que, mantendo-se constantes os demais fatores que influenciam o escoamento, a equação original poderia ser simplificada para uma forma com dois parâmetros dependentes apenas do fluxo de ar.

O modelo empírico mais amplamente empregado para estimar a resistência ao fluxo de ar em leitos fixos de grãos é o proposto por Shedd (1953). O autor sugeriu uma equação do tipo potencial para descrever a relação entre a queda de pressão e o fluxo de ar, recomendando sua aplicação em faixas relativamente estreitas, aproximadamente $0,005$ a $0,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, em virtude da não linearidade observada em representações log-log fora desse intervalo, o que foi posteriormente aprimorado por Hukill e Ives (Ramaj et al., 2022; Górnicki et al., 2015b). Por se tratar de um modelo empírico, a equação de Shedd não incorpora explicitamente propriedades físicas como porosidade, diâmetro de partícula e esfericidade, diferentemente da

equação de Ergun (1952). Ainda assim, sua simplicidade matemática, facilidade de ajuste e boa capacidade de representação de dados experimentais justificam sua ampla adoção na literatura. Em diversos estudos com grãos e sementes, o modelo de Shedd tem apresentado elevado coeficiente de determinação, sendo considerado uma ferramenta prática e confiável para a estimativa da perda de carga em sistemas de ventilação agrícola. Embora seja essencialmente empírico, o modelo apresenta fundamentação conceitual ao refletir o comportamento combinado de efeitos viscosos e inerciais do escoamento em meios porosos (Górnicki et al., 2015a).

O modelo de Hukill e Ives (1955) surgiu como uma modificação da equação de Shedd (1953), com o objetivo de melhorar o ajuste aos dados experimentais em uma faixa mais ampla de velocidades superficiais. Esse modelo foi reconhecido pela American Society of Agricultural Engineers (ASAE) como expressão padrão para estimar a queda de pressão em massas de grãos submetidas a diferentes vazões de ar (Goneli et al., 2020; Navarro, Noyes; 2001; ASAE, 2002).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Procedimento experimental

O estudo foi conduzido na área experimental de protótipos da Unidade Armazenadora de Grãos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, localizada no município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil (20°45'00" S, 42°56'15" O, altitude de 643 m de altitude).

Foram utilizados caroços de algodão com línter e deslintados, cultivar IMA 5801 B2RF, provenientes de unidades de armazenamento e beneficiamento localizadas no município de Correntina, no estado da Bahia. No momento dos ensaios experimentais, os caroços com línter apresentavam um teor de água de $0,096 \text{ kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.), enquanto os caroços deslintados encontravam-se com teor de água de $0,092 \text{ kg}_{\text{água}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (b.s.).

Para determinar a resistência ao fluxo de ar, utilizou-se um equipamento experimental projetado para simular as condições de movimentação de ar referente as operações de secagem e aeração em silos metálicos (Figura 1). O protótipo empregado era constituído por (a) ventilador centrífugo acionado por motor de indução trifásico de 1,5 kW de potência, rotação nominal de 3460 rpm e rendimento de 85,5% para frequência de 60 Hz (Mercosul, modelo VRL80B2); (b) duto de transição cilíndrico, com 1,80 m de comprimento e 0,18 m de diâmetro, contendo um homogeneizador de fluxo de ar do tipo canaletas, instalado a 1,08 m da entrada; (c) seção de transição com angulação de 25°; (d) um *plenum* em chapas perfuradas e (e) coluna de grãos com 2,34 m de altura e diâmetro de 0,63 m.

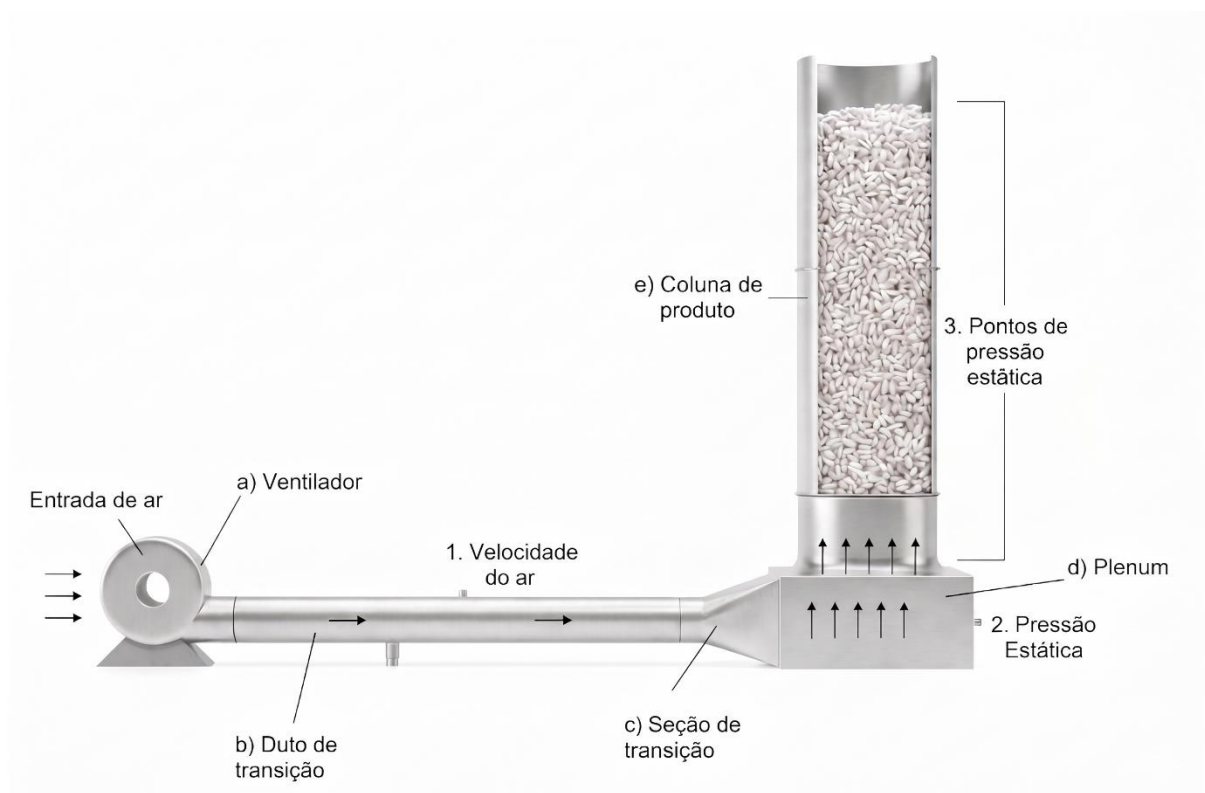


Figura 1. Protótipo para determinação da resistência ao fluxo de ar em coluna de caroços de algodão com línter e deslintados.

Fonte: A autora (2026).

O controle do fluxo de ar no sistema foi realizado por meio de um inversor de frequência com corrente nominal de 7 A (WEG, modelo CFW300), responsável pelo ajuste da rotação do ventilador. A pressão estática do ar foi medida utilizando-se três manômetros de coluna em “U”, com escala de 500 – 0 – 500 mm.ca (Rigitech, modelo MCU-500). Ao longo do protótipo, foram instaladas tomadas para a medição da pressão estática, sendo quatro pontos localizados no *plenum* e oito pontos distribuídos ao longo da coluna de grãos, espaçados uniformemente a cada 0,30 m.

A velocidade do ar foi determinada utilizando-se um termo anemômetro de fio quente (Instrutherm, modelo TAFR-200). As medições foram realizadas no duto de transição e na parte superior da coluna de grãos. No duto, os dados foram coletados em quatro pontos ao longo do diâmetro vertical. No topo da coluna, foram amostrados cinco pontos, sendo um central e quatro periféricos, correspondentes às direções norte, sul, leste e oeste, com o objetivo de avaliar a distribuição do fluxo de ar na saída do sistema.

A resistência ao fluxo de ar dos caroços de algodão com línter e deslintados, expressa como queda de pressão por unidade da altura da coluna, foi determinada para os fluxos de ar

estudados. As vazões foram ajustadas por meio de um inversor de frequência, operando em faixas de 3 a 60 Hz. Após o preenchimento da coluna de ensaio, o ventilador era acionado e o inversor regulado até atingir o fluxo de ar desejado. Em seguida, realizavam-se as medições das pressões estáticas. Após as medições, a coluna de ensaio era esvaziada e novamente preenchida, e o procedimento experimental repetido, totalizando três repetições para cada condição avaliada.

3.2 Modelagem matemática

A resistência ao fluxo de ar é influenciada por diversos fatores, o que dificulta a proposição de um modelo único capaz de correlacionar todos os mecanismos envolvidos na perda de carga (Razavizadeh et al., 2023). Inicialmente, os dados experimentais de pressão estática em função da altura do leito foram submetidos à análise de regressão linear, permitindo a determinação do gradiente de pressão para cada fluxo específico de ar aplicado, para os caroços de algodão com línter e deslintados.

Os valores de gradiente de pressão obtidos foram então utilizados como base para a modelagem matemática da resistência ao escoamento, por meio da aplicação de modelos empíricos e teóricos descritos na Tabela 1. Os ajustes foram realizados a partir de análises de regressão não linear, empregando o método iterativo de Gauss-Newton, utilizando-se o software Statistica®, versão 7.0 (StatSoft, 2004).

Tabela 1. Modelos matemáticos para a estimativa da perda de pressão estática de caroços de algodão.

Modelo	Equação	Número da Equação
Ergun (1952)	$\Delta PL = a^2 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu}{d^2} Q + b \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho}{d} Q^2$	(01)
Shedd (1953)	$\Delta PL = aQ^b$	(02)
Hukill and Ives (1955)	$\Delta PL = \frac{aQ^2}{\ln(1 + bQ)}$	(03)
Haque et al. (1978)	$\Delta PL = aQ + bQ^2 + cQI$	(04)
Hunter (1983)	$\Delta PL = aQ + bQ^2$	(05)
Giner & Deinisienia (1996)	$\Delta PL = (a + bI)Q(1 + 3Q)$	(06)
Guimarães (1998)	$\Delta PL = aQ^b + cI$	(07)

$$\text{ASABE (2007)} \quad \Delta PL = aQ^b(1 + (a - bQ)I) \quad (08)$$

$$\text{Linear} \quad \Delta PL = a + bQ \quad (09)$$

$$\text{Logaritmo} \quad \Delta PL = a \ln(Q) + b \quad (10)$$

Fonte: A autora (2026).

Em que: ΔPL – queda de pressão, Pa.m^{-1} ; Q – fluxo de ar, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-2}$; a, b, c – parâmetros de ajustes que dependem do produto, adimensional; ε – porosidade do leito, %; μ – viscosidade dinâmica do fluido, (Pa.s) ; d – diâmetro equivalente (m); ρ – massa específica do fluido (kg.m^3) ; I – teor de impurezas, decimal.

As propriedades físicas dos caroços de algodão com línter e deslintados estão descritas na Tabela 2. Essas foram obtidas conforme metodologia proposta por Mohsenin (1986).

Tabela 2. Propriedades físicas dos caroços de algodão usadas nos modelos de resistência ao fluxo de ar.

Propriedade	Com Línter	Deslintados
Porosidade (%)	69,56	42,62
Diâmetro equivalente (m)	0,00628	0,00591
Teor de impurezas (decimal)	0,015	0,001

Fonte: A autora (2026).

3.3 Análise estatística

Para a definição do modelo mais adequado à descrição da resistência ao fluxo de ar, realizou-se uma análise comparativa do desempenho estatístico dos modelos avaliados. Essa avaliação considerou, de forma conjunta o erro médio relativo (MRE), o desvio padrão da estimativa (SDE) e o coeficiente de determinação (R^2), os quais permitem quantificar, respectivamente, o grau de ajuste, a precisão e a dispersão dos valores estimados em relação aos dados experimentais (Azad et al., 2023). O cálculo desses indicadores foram efetuados conforme as Equações 11, 12 e 13, respectivamente.

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{Y_i} \quad (11)$$

$$SDE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{GLR}} \quad (12)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (13)$$

Em que: n – número de dados observados; Y_i – valor experimental, Pa.m⁻¹, b.s.; $\hat{Y}_i$ – valor estimado pelo modelo Pa.m⁻¹, b.s GLR – graus de liberdade do resíduo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento da pressão estática em função da altura da coluna de grãos para os caroços de algodão com línter e deslinterados é apresentado nas Figuras 2 e 3, respectivamente. A análise estatística dos ensaios permitiu identificar as faixas operacionais em que os dados apresentaram maior consistência física e regularidade no comportamento aerodinâmico. Para os caroços de algodão com línter, a estabilidade dos dados foi verificada no intervalo de fluxo de ar de 0,0046 a 0,2044 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Já para os caroços deslinterados, devido à maior permeabilidade do meio, a faixa de consistência situou-se em patamares superiores, compreendendo fluxos de 0,0057 a 0,7810 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Nesses intervalos específicos, os coeficientes de determinação (R^2) das regressões lineares foram substanciais, indicando que a perda de carga variou de forma proporcional à altura da coluna, conforme previsto pela teoria de fluxo em meios porosos (Kurpaska et al., 2020).

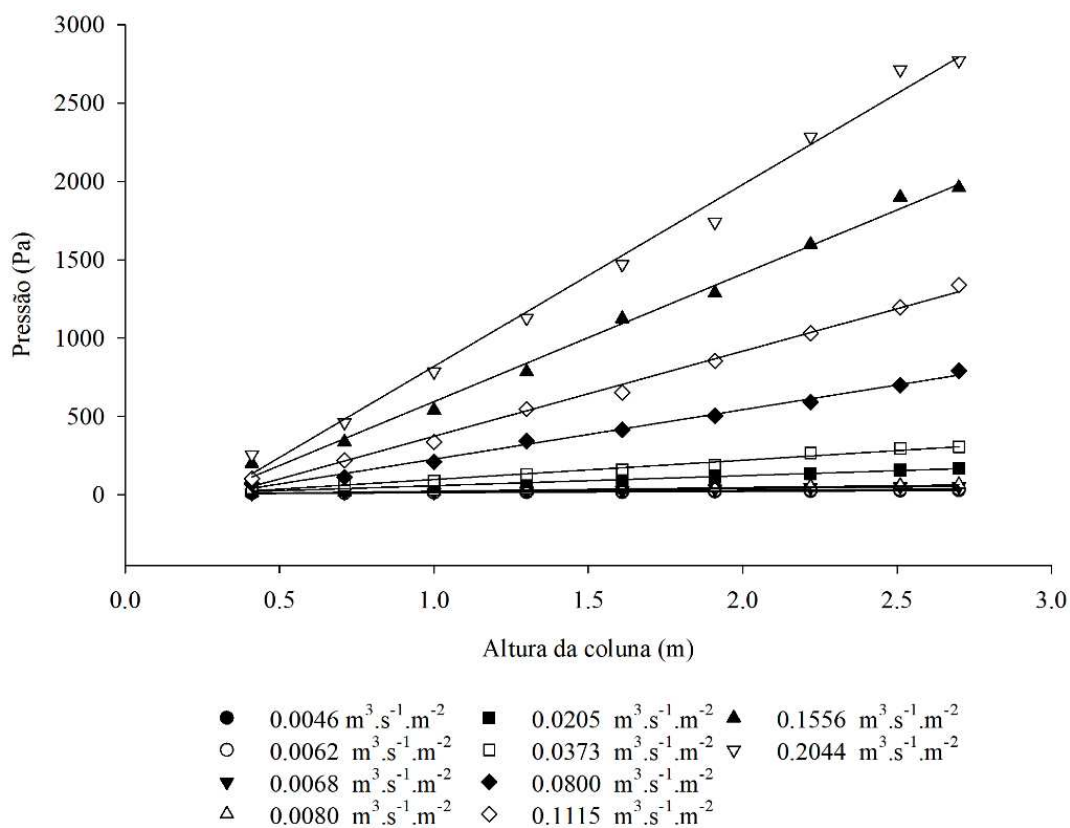


Figura 2. Pressão estática (Pa) em função da altura (m) da coluna de caroços de algodão com línter.

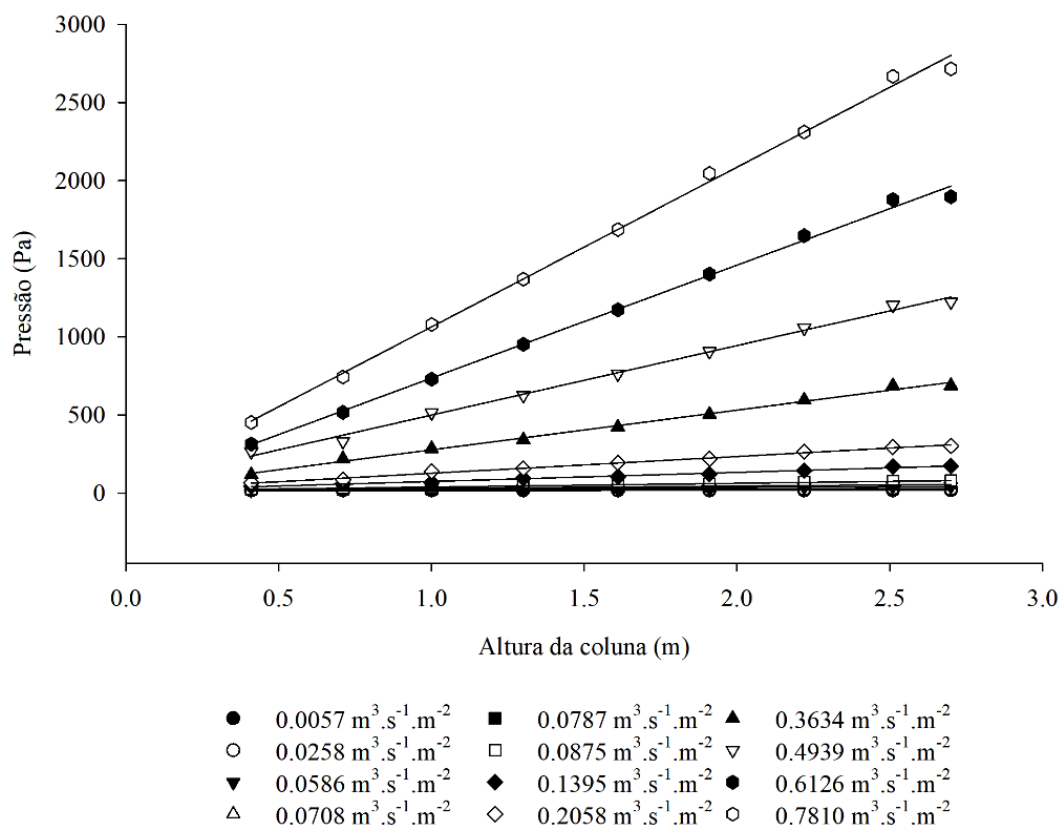


Figura 3. Pressão estática em função da altura da coluna de caroços de algodão deslintado.

Observa-se que para ambos os produtos, uma tendência predominantemente linear de aumento da pressão estática conforme o aumento da altura do leito de produto (L). Nota-se que ao duplicar a altura da coluna de grãos, por exemplo de 1,0 m para 2,0 m, o resultado é um aumento de aproximadamente duas vezes da queda de pressão estática medida. Adicionalmente, os gráficos evidenciam que o gradiente de pressão, representado pela inclinação das retas, torna-se progressivamente mais acentuado com o aumento do fluxo de ar. Esse comportamento demonstra que velocidades de ar mais elevadas requerem pressões estáticas maiores para vencer a resistência imposta pela coluna de produto. De acordo com Agullo e Marenha (2005), o aumento da pressão com a elevação do fluxo de ar está associado à maior dissipação da energia cinética do fluxo de ar à medida que a velocidade de escoamento aumenta. Essa tendência caracteriza a natureza não linear da relação entre o fluxo de ar e pressão, em que o aumento do fluxo intensifica os efeitos inerciais, as interações fluido-partícula e os fenômenos turbulentos, elevando a energia necessária para o ar atravessar a massa de grãos. Resultados com comportamento semelhante foram encontrados por Liu et al. (2022) para grãos de soja, Goneli

et al. (2020) para grãos de mamona, Silva e Tavares (2018) para grãos de café arábica, Silva et al. (2016) para grãos de crame.

Ao comparar os dois produtos, caroços de algodão com línter e deslinterados, torna-se evidente a influência das características superficiais do tegumento na hidrodinâmica do leito. Para os caroços de algodão com línter (Figura 2), observa-se elevada resistência ao escoamento do ar, mesmo sob fluxos de ar reduzidos. Segundo Ferreira et al. (2026) a porosidade é inversamente proporcional à resistência viscosa (relação linear), enquanto o diâmetro equivalente governa as perdas por turbulência (relação quadrática). No entanto, ao analisar os caroços de algodão com línter, observa-se um desvio desse comportamento padrão. Embora os caroços de algodão com línter apresentem maior porosidade intergranular e diâmetro equivalente, a presença das fibras altera drasticamente a configuração desses espaços. As fibras atuam segmentando os macroporos em uma rede de microporos de diâmetro reduzido. Consequentemente, o línter atua simultaneamente reduzindo a área livre efetiva para a passagem do ar e elevando o coeficiente de atrito superficial, além de promover um entrelaçamento entre as partículas, reduzindo a porosidade efetiva e aumentando a tortuosidade dos canais por onde o fluido escoar, o que resulta em uma perda de carga significativamente maior quando comparada à superfície lisa dos caroços deslinterados. Em contrapartida, os caroços deslinterados (Figura 3) apresentaram menor resistência ao escoamento, permitindo a operação com fluxos de ar significativamente superiores.

Um comportamento análogo foi observado em estudos com leitos de partículas de carvão vegetal e mineral (Koekemoer; Luckos, 2015). Nesse estudo, verificou-se que os leitos de carvão vegetal apresentaram maiores quedas de pressão do que os de carvão mineral, apesar de possuírem maior porosidade. Os autores atribuíram esse fenômeno à rugosidade superficial das partículas gerada pelo processo de desvolatilização. Assim como a rugosidade do carvão contribui significativamente para o atrito experimentado pelo fluido, o emaranhado de fibras do línter reduz o tamanho dos poros, dificultando a passagem do ar e resultando em gradientes de pressão mais elevados.

Considerando a altura de coluna em 2,70 m, que corresponde à soma da altura da coluna de grãos (2,34 m) com a altura referente ao primeiro ponto de medição de pressão estática localizado no *plenum* (0,36 m), o maior fluxo de ar aplicado aos caroços de algodão com línter foi de $0,2044 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, resultando em uma pressão estática de 2772 Pa. Para os caroços de algodão deslinterados, a obtenção de um valor de pressão estática semelhante foi constatada para o fluxo de $0,7810 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, quando a pressão estática foi igual a 2715 Pa. A remoção do línter resulta em uma superfície mais lisa e em um arranjo granular que favorece o escoamento do ar,

reduzindo a perda de carga por atrito. Observa-se ainda, em ambas as figuras, que o aumento do fluxo de ar resulta em um incremento na inclinação das retas ajustadas. Isso demonstra que a perda de carga é diretamente dependente da velocidade do fluido intersticial. Para os caroços com linter, essa sensibilidade é mais acentuada, em que uma pequena elevação no fluxo de ar resulta em elevações substanciais na pressão estática.

Os resultados sugerem implicações diretas no dimensionamento de sistemas de aeração e secagem. A maior resistência imposta ao fluxo de ar observada no caroço com linter implicará na necessidade de ventiladores com maior potência, resultando em um custo energético de operação consideravelmente mais alto em comparação ao processamento de caroços deslintados. Para o caroço deslintado, a menor resistência ao fluxo permite o uso de ventiladores de menor porte ou a possibilidade de trabalhar com colunas de grãos mais altas sem comprometer a uniformidade do processo, otimizando a capacidade estática dos silos.

A predição adequada da queda de pressão em sistemas de secagem e aeração é fundamental para o dimensionamento correto. As Tabelas 3 e 4 apresentam os parâmetros estimados e os critérios estatísticos de ajuste para os modelos testados em caroços de algodão com linter e deslintados, respectivamente. Os critérios utilizados para a seleção do melhor modelo fundamentaram-se na obtenção do maior coeficiente de determinação (R^2) e nos menores valores de erro médio relativo (MRE) e erro padrão da estimativa (SDE).

Observando a Tabela 3, referente aos ajustes para os caroços de algodão com linter, verifica-se que a maioria dos modelos apresentaram ajustes satisfatórios ($R^2 > 99\%$), o que demonstra a consistência dos dados experimentais. Dentre esses, o modelo de Shedd (1953) destacou-se como o mais robusto para descrever o fenômeno, apresentando um R^2 de 99,96%, menor erro médio relativo (MRE = 9,86%) e o menor erro padrão (SDE = 11,46 Pa). O modelo de Guimarães (1998), que é uma variação polinomial, obteve um R^2 similar (99,97%), mas com erros ligeiramente maiores que Shedd, com MRE de 11,94% e SDE de 11,91 Pa.

Nota-se também, a inadequação do modelo ASABE (2007) para o caroço com linter. Com um coeficiente de determinação de apenas 69,68% e um erro médio relativo exorbitante de 915,46%, este modelo mostra-se inaplicável. Isso ocorre provavelmente porque a equação da ASABE, referente a norma D272.3, são geralmente calibradas para grãos limpos e de geometria regular. A presença do linter cria uma matriz porosa complexa e de alta fricção que foge completamente aos parâmetros empíricos estabelecidos para grãos convencionais como soja ou milho.

Para os caroços de algodão deslintados (Tabela 4), o comportamento dos modelos foi ligeiramente diferente, reflexo da aerodinâmica do leito. O modelo de Shedd (1953) provou ser

robusto e consistente, apresentando valores de R^2 de 99,88% e o menor valor de MRE entre todos os testados, de 8,15%. Isso confirma que a relação de potência simples proposta por Shedd é aplicável para caroços de algodão na faixa estudada.

O modelo de Guimarães (1998) apresentou um coeficiente de determinação de 99,88%, idêntico ao obtido pelo modelo de Shedd. No entanto, ao avaliarmos os critérios de erro, o modelo de Guimarães registrou um MRE de 9,41% e um SDE de 18,50 Pa. Nota-se uma grande similaridade nos parâmetros estimados para os modelos de Guimarães e Shedd, em que o parâmetro ‘a’ foi de 1596,207 e ‘b’ de 1,7440 para o primeiro, enquanto para Shedd os valores de ‘a’ e ‘b’ foram 1596,177 e 1,744, respectivamente. A quase identidade entre os parâmetros principais sugere que o termo adicional do modelo de Guimarães, ou seja, o parâmetro $c = 24,695$, teve uma influência negativa no ajuste da curva para os caroços de algodão deslintados. O valor do parâmetro ‘c’ e o baixo percentual de impurezas, indica que a contribuição deste terceiro termo para a redução da soma dos quadrados dos resíduos foi inexpressiva. Embora o modelo de Guimarães seja estatisticamente robusto e válido para descrever o fenômeno, ele se mostra menos eficiente que o de Shedd para os caroços deslintados. O modelo de Shedd alcançou erros ligeiramente menores utilizando apenas dois parâmetros, enquanto Guimarães utilizou três para obter um resultado marginalmente inferior nos critérios de erro.

Nota-se que, para o produto deslintado, o modelo da ASABE obteve um desempenho significativamente melhor ($R^2 = 97,78\%$) do que para o produto com línter. Isso reforça a hipótese de que a remoção das fibras aproxima o comportamento aerodinâmico do caroço ao de grãos convencionais. Contudo, mesmo com a melhoria, ele ainda é estatisticamente inferior aos modelos de Shedd e Guimarães.

Tabela 3. Estimativa dos parâmetros para os modelos da resistência ao fluxo de ar ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) para caroços de algodão com línter.

Modelo	Parâmetro	R^2	MRE (%)	SDE (Pa)
Ergun (1952)	a: $3,2398 \times 10^{14}$	99,93%	22,03	16,32
	b: -313705,6			
Shedd (1953)	a: 9382,073	99,96%	9,86	11,46
	b: 1,314			
Hukill & Ives (1955)	a: 32131,32	99,94%	17,94	14,77
	b: 10,48			
Haque et al. (1978)	a: 3458,9	99,93%	22,03	17,45

	b: 12046,8 c: -11823,7			
Hunter (1983)	a: 3277,98 b: 12046,75	99,93%	22,03	16,32
Giner & Deinisienia (1996)	a: 3515,637 b: 661,641	99,91%	27,47	17,79
Guimarães (1998)	a: 9561,937 b: 1,328 c: 259,424	99,97%	11,94	11,91
ASABE (2007)	a: 109,7685 b: 145,4396	69,68%	915,46	308,02
Linear	a: -46,864 b: 5600,633	99,42%	88,88	46,30
Logaritmo	a: 243,241 b: 1175,465	87,78%	334,08	205,71

Fonte: A autora (2026).

*Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

Tabela 4. Estimativa dos parâmetros para os modelos da resistência ao fluxo de ar ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) para caroços de algodão deslintado.

Modelo	Parâmetros	R ²	MRE (%)	SDE (Pa)
Ergun (1952)	a: $1,5092 \times 10^{13}$ b: -13341,83	99,85%	78,92	19,38
Shedd (1953)	a: 1596,177 b: 1,744	99,88%	8,15	17,55
Hukill & Ives (1955)	a: 7450,978 b: 99,945	99,87%	27,42	17,87
Haque et al. (1978)	a: 217,038 b: 1436,828 c: -339,843	99,85%	78,92	20,43
Hunter (1983)	a: 216,665 b: 1436,828	99,85%	78,92	19,38
Giner & Deinisienia (1996)	a: 389,8021 b: 70,1203	99,71%	165,68	26,88

Guimarães (1998)	a:	1596,207		
	b:	1,744	99,88%	9,41
	c:	24,695		18,50
ASABE (2007)	a:	55,77629		
	b:	43,91485	97,78%	3188,48
Linear	a:	-87,256		
	b:	1275,304	97,80%	4025,47
Logaritmo	a:	178,6029		
	b:	599,8174	75,67%	15890,24

Fonte: A autora (2026).

*Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

A Figura 4 apresenta as curvas de Shedd obtidas a partir do gradiente de pressão em função do fluxo de ar para caroços de algodão com linter e deslintados, em escala logarítmica. Observa-se que, para ambos os materiais, há uma relação crescente entre o fluxo de ar e o gradiente de pressão, indicando aumento progressivo da resistência ao escoamento à medida que o fluxo de ar é elevado.

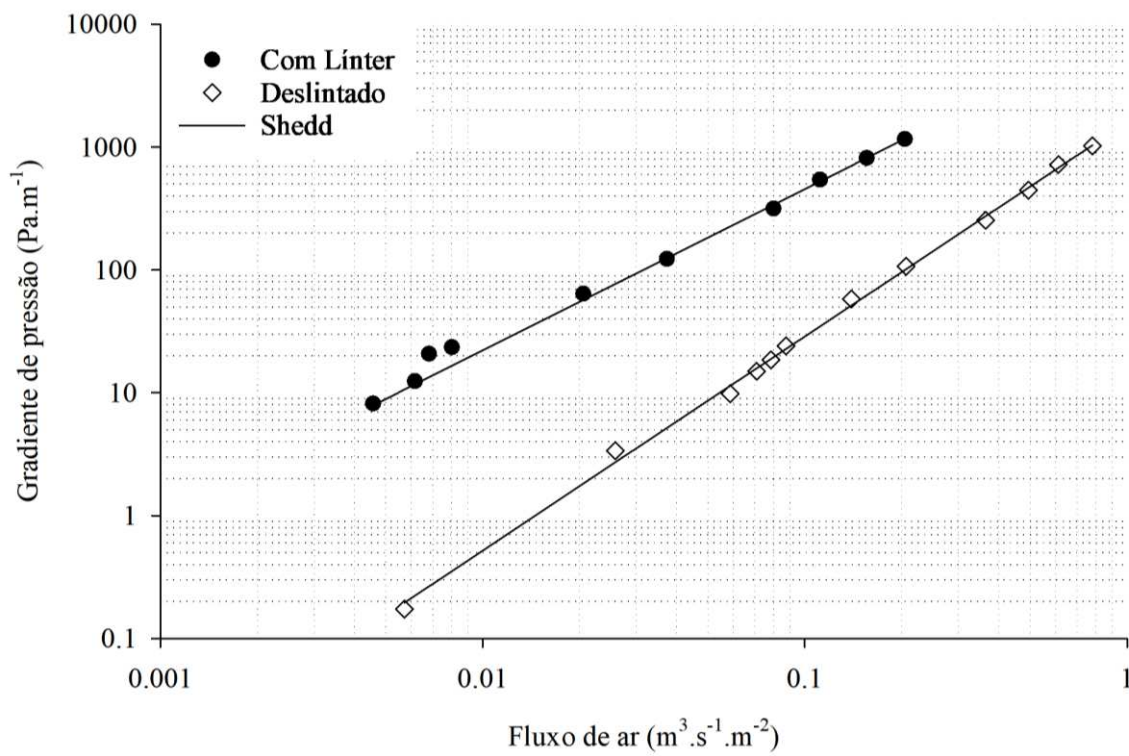


Figura 4. Ajuste da equação de Shedd aos dados experimentais de gradiente de pressão em função do fluxo de ar.

As curvas ajustadas segundo o modelo de Shedd evidenciam comportamentos distintos entre os dois produtos. Os caroços de algodão com línter apresentam, em toda a faixa de fluxos analisada, gradientes de pressão médios superiores aos observados para os caroços deslinterados. Esse deslocamento da curva para níveis mais elevados de gradiente de pressão indica maior resistência ao fluxo de ar, refletindo as características estruturais do leito formado pelos caroços de algodão com línter.

A inclinação das curvas em escala log-log confirma a natureza não linear da relação entre fluxo de ar e gradiente de pressão, conforme pressuposto pelo modelo de Shedd. Em fluxos mais baixos, o aumento do gradiente de pressão ocorre de forma mais moderada, sugerindo predominância de efeitos viscosos. À medida que o fluxo de ar aumenta, observa-se um crescimento mais acentuado do gradiente de pressão, indicando intensificação das forças de atrito e à maior turbulência do ar ao permear a massa granular (Razavizadeh et al., 2023). Comparativamente, os caroços deslinterados apresentam uma curva deslocada para baixo e com menor inclinação relativa, o que evidencia melhores condições de permeabilidade ao ar. A remoção do línter resulta em partículas com superfície mais lisa e geometria mais regular, favorecendo uma distribuição mais homogênea e a formação de canais de escoamento mais contínuos. Como consequência, o escoamento do ar ocorre com menor dissipação de energia e menores perdas de carga ao longo da coluna. Estudos comparativos com outros grãos destacam que a textura do tegumento pode alterar significativamente os resultados aerodinâmicos (Lukaszuk et al., 2009). Os autores citam o exemplo da aveia, que, devido à sua casca espessa, macia e de textura rugosa, apresentou comportamento distinto de grãos de superfície lisa e regular de mesmo formato.

Os resultados obtidos corroboram a aplicabilidade do modelo de Shedd na caracterização da resistência ao fluxo de ar em colunas de produtos agrícolas, conforme já reportado para quinoa (Gratão et al., 2013), pistache (Kashaninijad; Tabil, 2009) e papoula (Sacilik, 2004). Além disso, o modelo apresentou bom ajuste aos dados experimentais deste estudo, demonstrando capacidade adequada de representar o comportamento da perda de carga e podendo ser aplicado com confiabilidade nas faixas de fluxo de ar avaliadas.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos para a resistência ao fluxo de ar em colunas de caroços de algodão com línter e deslintados, conclui-se que a pressão estática apresentou comportamento linear em função da altura da coluna de grãos e não linear (potência) em função do fluxo de ar para ambos os produtos. O aumento do fluxo de ar intensificou as forças de atrito e a turbulência, elevando a resistência do sistema.

O modelo de Shedd (1953) foi o que melhor representou os dados experimentais para ambos os produtos, apresentando coeficientes de determinação, $R^2 > 99\%$, e menores erros médios relativos ($MRE < 10\%$).

A presença do línter exerce uma influência drástica na aerodinâmica da massa granular. Apesar de promoverem uma maior porosidade teórica no leito, as fibras criam uma superfície de alta rugosidade e reduzem o diâmetro dos espaços porosos. Isso resultou em gradientes de pressão superiores nos caroços com línter em comparação aos deslintados, para as mesmas faixas de fluxo de ar.

O processo de deslintamento altera significativamente a interação fluido-partícula, levando a menores valores de perda de carga em sistemas de secagem e aeração. Dessa forma, o armazenamento de caroços deslintados é energeticamente mais eficiente, permitindo o uso de ventiladores de menor potência ou o trabalho com colunas de grãos mais elevadas em comparação aos caroços com línter.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGULLO, J. O.; MARENIA, M. O. Airflow resistance of parchment arabica coffee. **Biosystems engineering**, v. 91, n. 2, p. 149-156, 2005. [doi: 10.1016/j.biosystemseng.2005.02.008].

ASAE Standards. Standards engineering practices data, New York, **American Society of Agricultural Engineers**, 49th ed. 1041p, 2002.

ASABE - Asabe Standards. ASAE D272.3 MAR1996 (R2007). Resistance to airflow of grains, seeds, other agricultural products, and perforated metal sheets. **American Society of Agricultural Engineers**, v.54, p.544-550, 2007.

AZAD, Neda Maftoon et al. Effects of thermodynamic properties of rice and ambient conditions on moisture migration during storage at naturally ventilated warehouses. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 16, n. 7, p. 104761, 2023. [doi: 10.1016/j.arabjc.2023.104761].

BROOKER, Donald B.; BAKKER-ARKEMA, Fred W.; HALL, Carl W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Springer Science & Business Media, 1992.

CARRILLO, Douglas Santos et al. Characterisation of pore structure of bulk wheat mixed with dockage using X-ray micro-computed tomography and deep learning. **Biosystems Engineering**, v. 240, p. 62-76, 2024. [doi: 10.1016/j.biosystemseng.2024.03.001].

CORADI, Paulo Carteri et al. Influences of drying temperature and storage conditions for preserving the quality of maize postharvest on laboratory and field scales. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 22006, 2020. [doi: 10.1038/s41598-020-78914-x].

ERGUN, Sabri. Fluid flow through packed columns. *Chemical engineering progress*, v. 48, n. 2, p. 89, 1952.

FERREIRA, Higor Marques et al. Evaluation of air dynamic in stored grains using different types of aeration duct. **Journal of Stored Products Research**, v. 116, p. 102929, 2026. [doi: 10.1016/j.jspr.2025.102929].

GUIMARAES, Warley Teixeira. **Efeito do nível e do tipo de impurezas na resistência ao fluxo de ar em camadas de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1998. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa.

GINER, S. A.; DENISIENIA, E. Pressure drop through wheat as affected by air velocity, moisture content and fines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 63, n. 1, p. 73-85, 1996. [doi: 10.1006/jaer.1996.0009].

GONELI, André LD et al. Static pressure drop in layers of castor bean grains. **Engenharia Agrícola**, v. 40, p. 184-191, 2020. [doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p184-191/2020].

GORNICKI, KRZYSZTOF; KALETA, AGNIESZKA. Resistance of bulk grain to airflow-a review. Part II: Effect of process parameters. **Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Agriculture**, n. 65 Agric. Forest Eng, 2015a.

GORNICKI, Krzysztof; KALETA, Agnieszka. Resistance of bulk grain to airflow-a review. Part I: Equations for airflow resistance. **Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Agriculture**, n. 65 Agric. Forest Eng, 2015b.

GRATAO, Poliana T.S. et al. Loss of static pressure in a column of quinoa grains/Perda de pressão estática em uma coluna de grãos de quinoa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 8, p. 848-855, 2013.

HAQUE, E. et al. Static pressure drop across a bed of corn mixed with fines. **Transactions of the ASAE**, v. 21, n. 5, p. 997-1000, 1978. [doi: 10.13031/2013.35430].

HUKILL, W. V.; IVES, N. C. Radial air flow resistance of grain. Vol. 36, No. 5, 332-5 ref. bibl. 4, 1955.

HUNTER, A. J. Pressure difference across an aerated seed bulk for some common duct and store cross-sections. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 28, n. 5, p. 437-450, 1983. [doi: 10.1016/0021-8634(83)90135-X].

JIAN, Fuji; JAYAS, Digvir S. Aeration and chilled aeration for insect, mite, and microflora management and grain quality preservation. **Control and Management of Pests in Stored Products**, p. 331-378, 2024. [doi: 10.1201/9781003309888].

KASHANINEJAD, M.; TABIL, L. G. Resistance of bulk pistachio nuts (Ohadi variety) to airflow. **Journal of Food Engineering**, v. 90, n. 1, p. 104-109, 2009. [doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.06.007].

KOEKEMOER, Andrei; LUCKOS, Adam. Effect of material type and particle size distribution on pressure drop in packed beds of large particles: Extending the Ergun equation. **Fuel**, v. 158, p. 232-238, 2015.

KUPTZ, Daniel; HARTMANN, Hans. Prediction of air pressure resistance during the ventilation of wood chips as a function of multiple physical fuel parameters. **Biomass and Bioenergy**, v. 145, p. 105948, 2021. [doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105948].

KURPASKA, Sławomir et al. Analysis of air flow resistance through a porous stone bed. **Biosystems Engineering**, v. 198, p. 323-337, 2020. [doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.08.002].

KHATCHATOURIAN, O. A.; SAVICKI, D. L. Mathematical modelling of airflow in an aerated soya bean store under non-uniform conditions. **Biosystems Engineering**, v. 88, n. 2, p. 201-211, 2004. [doi: 10.1016/j.biosystemseng.2004.03.001].

LAWRENCE, Johnselvakumar; MAIER, Dirk E.; STROSHINE, Richard L. Three-dimensional transient heat, mass, momentum, and species transfer in the stored grain ecosystem: Part I. Model development and evaluation. **Transactions of the ASABE**, v. 56, n. 1, p. 179-188, 2013. [doi: 10.13031/2013.42569].

LIU, Wenlei et al. Experimental and numerical study of pressure drop characteristics of soybean grain under vertical pressure. **Applied Sciences**, v. 12, n. 14, p. 6830, 2022. [doi: doi.org/10.3390/app12146830].

ŁUKASZUK, Józef et al. Variability of pressure drops in grain generated by kernel shape and bedding method. **Journal of Stored Products Research**, v. 45, n. 2, p. 112-118, 2009. [doi: 10.1016/j.jspr.2008.10.005].

MANANDHAR, Ashish; MILINDI, Paschal; SHAH, Ajay. An overview of the post-harvest grain storage practices of smallholder farmers in developing countries. **Agriculture**, v. 8, n. 4, p. 57, 2018. [doi: 10.3390/agriculture8040057].

MOHSENIN, N. N. Physical Properties of Plants and Animal Materials. Gordon and Breach **Science Publishers**, 1986. New York, 1986.

NAVARRO, Shlomo; NOYES, Ronald T. **The mechanics and physics of modern grain aeration management**. CRC press, 2001.

NWAIZU, Charles; ZHANG, Qiang. Computational modeling of heterogenous pore structure and airflow distribution in grain aeration system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 188, p. 106315, 2021. [doi: 10.1016/j.compag.2021.106315].

OLATUNDE, Gbenga; ATUNGULU, Griffiths G.; SADAKA, Sammy. CFD modeling of air flow distribution in rice bin storage system with different grain mass configurations. **biosystems engineering**, v. 151, p. 286-297, 2016. [doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.09.007].

PANIGRAHI, Shubham Subrot; SINGH, Chandra B.; FIELKE, John. CFD modelling of physical velocity and anisotropic resistance components in a peaked stored grain with aeration ducting systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 179, p. 105820, 2020. [doi: 10.1016/j.compag.2020.105820].

RAMAJ, Iris et al. Influence of Self-Compaction on the Airflow Resistance of Aerated Wheat Bults (*Triticum aestivum* L., cv. ‘Pionier’). **Applied Sciences**, v. 12, n. 17, p. 8909, 2022. [doi: 10.3390/app12178909].

RAZAVIZADEH, Naser et al. Experimental study and numerical simulation of resistance to airflow in a storage bin of rough rice with three inlet duct configurations. **Biosystems Engineering**, v. 225, p. 118-131, 2023. [doi: 10.1016/j.biosystemseng.2022.12.003].

ROCHA, Jeferson C. et al. Effects of mass compaction on airflow resistance through paddy rice grains. **Biosystems engineering**, v. 194, p. 28-39, 2020. [doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.03.007].

SACILIK, KAMİL. Resistance of bulk poppy seeds to airflow. **Biosystems Engineering**, v. 89, n. 4, p. 435-443, 2004. [doi: 10.1016/j.biosystemseng.2004.08.021].

SADEGHIZADEH, Amin; JIAN, Fuji; JAYAS, Digvir S. Characterisation of airflow resistance of different moisture content wheat bulks mixed with different percentages and sizes of dockage. **Biosystems Engineering**, v. 258, p. 104261, 2025. [doi: 10.1016/j.biosystemseng.2025.104261].

SILVA, Filipe de Oliveira da; TAVARES, Ednilton Andrade. Static pressure drop across a bed of coffee beans: finite element analysis. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuárias**, v. 27, n. 4, 2018.

SILVA, Magnun Antonio Penariol et al. Variation of static pressure in a crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) grains column. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 1, p. 16-22, 2016. [doi: 10.5897/AJAR2015.10489].

SUGRI, Issah et al. Postharvest losses and mitigating technologies: evidence from Upper East Region of Ghana. **Sustainable futures**, v. 3, p. 100048, 2021. [doi: 10.1016/j.sftr.2021.100048].

SHEDD, Claude K. Resistance of grains and seeds to air flow. **Agricultural Engineering**, v. 34, n. 9, p. 616-619, 1953.

SRIVASTAVA, Shubhangi; MISHRA, Hari Niwas. Ecofriendly nonchemical/nonthermal methods for disinfestation and control of pest/fungal infestation during storage of major important cereal grains: A review. **Food Frontiers**, v. 2, n. 1, p. 93-105, 2021. [doi:

STATSOFT. **Statistica** (data analysis software system), version 7. Inc. (2004). Disponível em: <www.statsoft.com>. Acesso em 24 abr. 2024.

YAZDANPANAHI, F. et al. Airflow versus pressure drop for bulk wood pellets. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1960-1966, 2011. [doi: 10.1016/j.biombioe.2011.01.042].

CONCLUSÃO GERAL

De modo geral, os resultados dessa pesquisa evidenciam que tanto o teor de água quanto a presença do línter são fatores determinantes no comportamento físico, termodinâmico e aerodinâmico dos caroços de algodão. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que:

- Capítulo 01: O aumento do teor de água provoca a expansão dimensional dos caroços de algodão, tornando-os menos esféricas e circulares (mais oblongas) e promove o escurecimento do tegumento em ambos os produtos. A presença do línter afeta drasticamente o comportamento gravimétrico: enquanto nos caroços deslinterados a massa específica aparente diminui e a porosidade aumenta com o teor de água, nos caroços com línter ocorre o inverso, devido à alta retenção de água pelas fibras. Aerodinamicamente, os caroços de algodão deslinterados exigem maiores fluxos de ar para atingir a suspensão (maior velocidade terminal) operando sob maiores números de Reynolds, mas o línter aumenta significativamente o coeficiente de arrasto desses;
- Capítulo 02: As isotermas de sorção de ambos os produtos seguem um formato exponencial (Tipo III), típico de materiais ricos em lipídios, sendo o modelo matemático Sigma-Copace o mais eficiente para sua predição. A análise comprovou a existência de histerese (diferença entre adsorção e dessorção), que é intensificada pela presença do línter. Em relação às propriedades termodinâmicas, o calor isotérico integral e a entropia diminuem com o aumento de água, e validou-se a teoria isocinética, mostrando que o processo de sorção não é espontâneo e é controlado pela entalpia;
- Capítulo 03: A perda de carga (pressão estática) varia linearmente com a altura da coluna de grãos e exponencialmente com a vazão de ar. A presença do línter cria uma superfície altamente rugosa e microcanais mais estreitos, o que resulta em uma resistência ao fluxo de ar drasticamente maior nos caroços com línter. Por outro lado, a remoção das fibras nos produtos deslinterados melhora a permeabilidade aerodinâmica, resultando em menor perda de energia. O modelo empírico de Shedd foi o mais adequado para estimar essa perda de carga em ambos os tratamentos.

Portanto, os dados gerados fornecem subsídios técnicos e científicos consistentes para o aprimoramento das operações de secagem, aeração e armazenamento seguro dos caroços de

algodão com línter e deslintados, contribuindo para a redução de perdas pós-colheita e para a otimização energética da indústria.