



FORÇAS DE ADESÃO E A MOVIMENTAÇÃO DO BAGAÇO DE MALTE EM SECADORES ROTATIVOS

GUILHERME H. A. PINTO^{1*}, JOSÉ T. FREIRE¹, FLÁVIO B. FREIRE², FÁBIO B. FREIRE¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química,
Departamento de Engenharia Química

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Construção Civil
*e-mail: guilherme.pinto@estudante.ufscar.br

RESUMO - Os fenômenos de interação superficiais podem influenciar negativamente alguns processos industriais, tornando a operação não-homogênea. Estes fenômenos estariam presentes também na secagem de biomassas. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da umidade do bagaço de malte sobre sua movimentação em secadores rotativos por meio de sua coesão e adesão. No início da secagem, a biomassa formou um aglomerado coeso com baixa mobilidade, com taxa de movimentação das partículas, Ω_s , de aproximadamente 17 rpm. Com a diminuição do adimensional de umidade de 1,0 para 0,6, foi observado o desprendimento gradual da biomassa, que aderiu à parede do secador e era arrastada juntamente com seu movimento rotacional. Nesta etapa, houve uma intensificação na mistura, com Ω_s aumentando de 17 para 27 rpm. Com o andamento da secagem, e a diminuição da umidade de 0,6 até a condição de equilíbrio, o bagaço interagiu com a parede do secador com menor eficiência e Ω_s diminuiu a 16 rpm. Foi observada a diminuição das forças de adesão com a umidade até um ponto em que estas fossem negligenciadas. Evidenciou-se assim a necessidade de amenizar os efeitos negativos da adesão para tornar constante a circulação das partículas ao longo de toda a operação.

INTRODUÇÃO

A adesão de um material é a interação que se estabelece ao entrar em contato com outras superfícies. A adesão resultante é a soma de diferentes mecanismos de interação superficial, como as forças de repulsão, forças de atração de van der Waals, atração ou repulsão eletrostática e a capilaridade, sendo a última predominante sobre as demais forças em condições de elevada umidade (Li et al., 2014; Thundat et al., 1993). As forças capilares estão relacionadas à presença de água sobre a superfície dos materiais e quando estes entram em contato ocorre a formação de um filme. A água envolvida na etapa de adesão pode ser proveniente tanto da condensação do ar úmido quanto da migração de água presente na superfície (Feiler et al., 2007). Como a tensão

superficial no filme líquido seria responsável por manter ligado as partes do material, a umidade estaria relacionada à tendência de acúmulo em processos que envolvem biomassas (Morris et al., 2018). A adesão também é influenciada pelas propriedades do adesivo e do aderente, como a energia superficial do aderente, a presença de açúcares no adesivo, entre outras (Bhandari & Howes, 2005; Kudra, 2003).

As interações superficiais podem provocar efeitos negativos em diversos processos industriais. Durante o processamento de café instantâneo, em condições específicas ocorre a formação de aglomerados que leva à não-uniformidade e à formação de compostos voláteis e, conseqüentemente, o produto final apresenta características indesejáveis para sua comercialização (Leobet et al., 2020). Na produção de baterias de lítio, as variações nas

forças de adesão seriam responsáveis pelo rompimento do contato durante a secagem (Jaiser et al., 2017). Na secagem de bagaço de malte em um tambor rotativo utilizando vapor superaquecido foi observado o acúmulo de material sobre a superfície interna do secador, especialmente em regiões próximas a alimentação, onde a umidade da biomassa seria maior (Stroem et al., 2009).

Dentre os materiais considerados pegajosos e que apresentam uma grande capacidade de aderência se encontra o bagaço de malte, principal subproduto da indústria cervejeira. O bagaço de malte é uma biomassa lignocelulósica composta principalmente por água, que corresponde a 70 a 80% de sua massa total, enquanto o bagaço seco é composto principalmente por lignina, hemicelulose e celulose, que correspondem a 30,48, 26,94 e 19,21% respectivamente (Mussatto et al., 2006; Ravindran et al., 2018). Usualmente, o bagaço de malte precisa ser seco para ser destinado às suas principais aplicações, tanto para reduzir os custos de manuseio quanto para prolongar o seu tempo de armazenamento e evitar o desenvolvimento de microrganismos (Shih et al., 2020; Trujillo et al., 2018). No entanto, faz-se necessário compreender os mecanismos de interação superficial do bagaço e sua influência sobre a operação de secagem para viabilizá-lo.

Com base neste cenário, o presente trabalho teve como objetivo avaliar como a umidade do bagaço de malte influencia o movimento das partículas no interior de secadores rotativos através das interações superficiais. Para tanto, foi utilizada uma drageadeira padrão associada a um soprador externo devido à sua abertura frontal, que permitia visualizar a movimentação das partículas, mensurar a taxa de circulação de sólidos no interior do secador e coletar amostras de biomassa com certa facilidade. Foram analisadas quatro condições operacionais distintas, variando a temperatura do ar de secagem e a massa inicial de biomassa alimentada no secador e observando sua influência sobre o movimento do material. Em cada condição avaliada, a taxa de movimentação das partículas foi relacionada à umidade usual do material. Por fim, utilizou-se o método centrífugo para determinar a relação

entre a umidade do bagaço e a força de adesão entre a biomassa e superfícies de cobre.

MATERIAL E MÉTODOS

Obtenção e armazenamento do bagaço

O bagaço de malte utilizado no presente trabalho foi obtido de uma microcervejaria e mantido sob refrigeração constante a 3 °C para preservar suas características. Foi utilizado bagaço de malte proveniente da produção de cervejas do tipo IPA.

Secagem do bagaço de malte

O secador rotativo utilizado na secagem do bagaço de malte era composto por uma drageadeira padrão PRIMAR® de cobre com um diâmetro de 285 mm e 195 mm de profundidade associada a um soprador externo Fabbe-Primar, modelo 128, conforme representado pela Figura 1. O movimento rotacional da drageadeira foi feito por um motor 56-RC-6334, sendo a velocidade rotacional da drageadeira fixada em 33,9 rpm. Um sistema de resistências com potência nominal de 1000 W presente no soprador era responsável pelo aquecimento do ar, sendo a potência ajustada por um controlador manual e a temperatura do ar, T_a , medida com o auxílio de um termopar posicionado no bocal do soprador. A velocidade do ar era de $6,76 \pm 0,04$ m/s, sendo esta aferida através de uma sonda Tri-Sense posicionada no bocal do soprador.

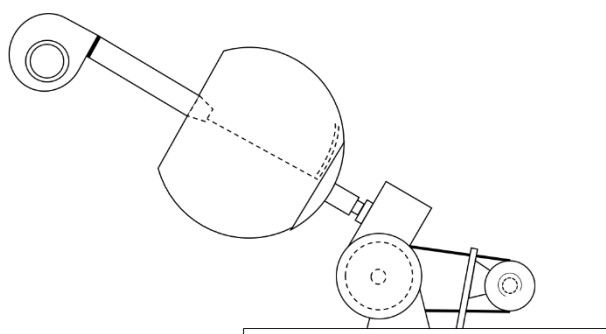


Figura 1: Representação esquemática do secador rotativo composto por uma drageadeira padrão associada a um soprador externo.

A estrutura interna da drageadeira foi modificada com o objetivo de promover a movimentação da biomassa. Foram adicionadas sobre a superfície interna seis placas de

borracha com 15 cm de comprimento, 1,5 cm de largura e 0,5 cm de espessura igualmente espaçadas e na região inferior da drageadeira, foi posicionado um raspador de borracha com 8 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro para desprender mecanicamente material acumulado. O raspador de borracha era preso ao suporte da drageadeira, permanecendo em uma posição fixa.

Para os experimentos de secagem, o soprador era ligado previamente até que houvesse sua estabilização, sendo a temperatura do ar de secagem mantida constante. Então, uma carga inicial de biomassa de massa conhecida, m_{s0} , era adicionada ao sistema e, posteriormente, o motor era ligado juntamente com o direcionamento do soprador para a abertura da drageadeira. Em intervalos pré-definidos de tempo, amostras de biomassa eram coletadas para a determinação de seu adimensional de umidade. Juntamente com a coleta de amostras, era determinada a velocidade de circulação dos sólidos no interior da drageadeira, Ω_s . Para tanto, foi adicionado ao leito um traçador de alumínio com diâmetro igual a 1 cm, sendo Ω_s calculado pela razão entre o número de ciclos do traçador e o tempo de amostragem. Os experimentos de secagem foram conduzidos em quatro condições diferentes, sendo estas representadas pela Tabela 1.

Tabela 1: Condições operacionais utilizadas nos ensaios de secagem.

Condição	m_{s0} (kg)	T_a (°C)
1	1,0	101,2
2	1,5	101,2
3	1,0	67,7
4	1,5	67,7

A umidade das amostras foi determinada através do método gravimétrico. Para tanto, as amostras foram submetidas à secagem em uma estufa com circulação e renovação de ar a 105 °C por um período de 24 horas. A umidade em base úmida, X_{bu} , foi calculada pela razão entre a diferença da massa da amostra antes e após a secagem e sua massa inicial. O adimensional de

umidade, MR, foi determinado através da Equação 1, onde $X_{bu,i}$ e $X_{bu,eq}$ correspondem à umidade inicial e de equilíbrio dinâmico, respectivamente.

$$MR = \frac{X_{bu,i} - X_{bu}}{X_{bu,i} - X_{bu,eq}} \quad (1)$$

Comportamento térmico entre fases

O comportamento térmico no contato entre as fases envolvidas na secagem do bagaço de malte foi avaliado ao se relacionar as temperaturas da própria biomassa e das paredes do secador. Com o auxílio de um termômetro infravermelho UT300A posicionado na abertura da drageadeira foram determinadas a temperatura dos sólidos, T_s , e a temperatura da parede, T_w . As medições de temperatura foram realizadas simultaneamente à amostragem de biomassa para a determinação da umidade e à obtenção de Ω_s . Para relacionar as temperaturas foi proposto um adimensional de temperatura, θ , definido como a razão entre T_s e T_w .

Determinação das forças de adesão

As forças de adesão entre o bagaço de malte e superfícies de cobre foram determinadas através do método centrífugo. Foram utilizadas 11 amostras de bagaço com diferentes umidades, uma vez que foram submetidas a secagem em estufa em intervalos que variaram de 0 a 24 horas. A umidade de cada amostra foi determinada pelo método gravimétrico. No método centrífugo, a força de adesão entre uma superfície e um material específico é considerada igual à força centrífuga necessária para seu desprendimento, F_{cent} (Nguyen et al., 2010). Para atender os objetivos do trabalho, foram feitas modificações a uma centrífuga convencional, sendo adicionadas ao eixo da centrífuga duas placas quadradas de ferro com 6,30 cm de aresta e 0,40 cm de espessura e sobre as placas de ferro foram fixadas duas folhas de cobre com 1,0 mm de espessura.

Inicialmente, o bagaço de malte previamente seco era confinado entre as duas folhas de cobre, cobrindo completamente sua superfície e um peso com uma massa igual a 0,8 kg era posicionado sobre as folhas, comprimindo a biomassa e promovendo sua adesão. As folhas de cobre com a biomassa aderida eram fixadas sobre as placas de ferro e,

posteriormente, o sistema completo era posicionado sobre o eixo da centrífuga. Durante os ensaios, havia o aumento da velocidade angular da centrífuga, w , até ser observado o desprendimento de parte do bagaço de malte aderido. A massa de biomassa desprendida, m_{des} , era determinada e a força de adesão calculada através da Equação 2. A Figura 2 é uma representação do método centrífugo e da modificação estrutural do equipamento.

$$F_{ad} = F_{cent} = m_{des}w^2r \quad (2)$$

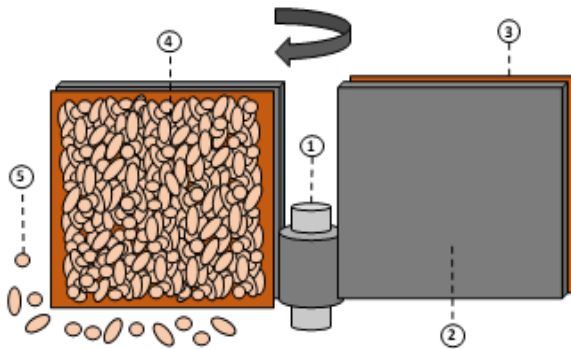


Figura 2: Representação esquemática do método centrífugo e seus elementos: (1) eixo da centrífuga; (2) placas de ferro; (3) folhas de cobre; (4) bagaço aderido; (5) bagaço desprendido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Movimentação do bagaço de malte no secador rotativo

A Figura 3 apresenta a relação entre a taxa de movimentação das partículas de bagaço de malte e sua umidade nas quatro condições avaliadas. Os resultados indicaram que a taxa de movimentação das partículas, Ω_s , não foi significativamente influenciada pela temperatura do ar de secagem ou pela carga inicial de biomassa. Foi observada uma relação entre o movimento das partículas no interior do secador rotativo e a umidade, com o aumento de Ω_s de aproximadamente 17 para 27 rpm com a diminuição da razão de umidade de 1,0 para 0,6 e posteriormente, com o avanço da secagem até a condição de equilíbrio, houve a diminuição de Ω_s a aproximadamente 16 rpm.

Devido à abertura existente na drageadeira, era possível identificar visualmente padrões no movimento da biomassa relacionados aos dados representados na Figura 3. No início da operação, todo o

bagaço de malte formava um único aglomerado coeso que apresentava uma baixa mobilidade. À medida que a secagem era conduzida e, como consequência, a umidade da biomassa era reduzida, parte das partículas se desprendia do aglomerado proporcionando uma maior movimentação. Na condição de máxima circulação dos sólidos, o aglomerado foi completamente desfeito e as partículas se movimentavam pelas interações superficiais com a parede metálica do secador. O bagaço de malte desprendido aderiu à superfície interna da drageadeira e era arrastado devido ao movimento rotacional e, ao atingir certa altura, era desprendido pela ação gravitacional e retornava à região inferior do leito, sendo estabelecido um movimento cíclico. O movimento das partículas da biomassa se aproximava de uma “avalanche”, consistindo de um cascadeamento. À medida que a secagem prosseguia, da movimentação máxima até o término da operação, pôde-se observar que as partículas arrastadas por ação da rotação da drageadeira alcançavam alturas cada vez menores e o movimento do bagaço se tornava menos intenso, uma vez que os agitadores posicionados no interior da drageadeira não foram suficientes.

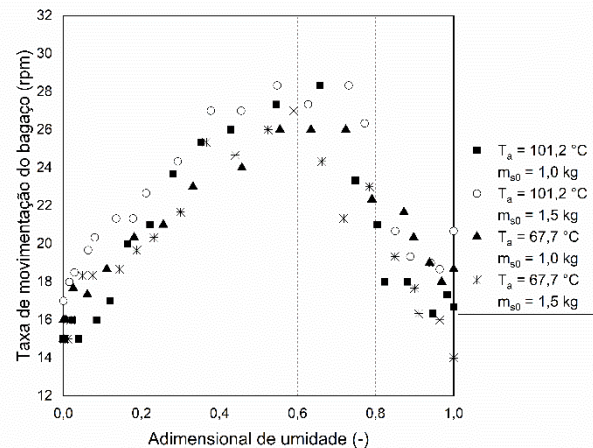


Figura 3: Taxa de movimentação do bagaço de malte em função de sua umidade nas quatro condições avaliadas.

A variação observada para a movimentação da biomassa no interior do secador rotativo selecionado está de acordo com os resultados obtidos em outros trabalhos. Ma et al. (2019) observaram que o ângulo de repouso de sólidos era maior em condições de elevada umidade se comparado com o mesmo

material seco, indicando que sólidos úmidos apresentariam uma menor escoabilidade. Os autores também avaliaram o comportamento das partículas em um tambor rotativo, sendo observado um movimento independente e estável para o material seco e a coesão das partículas e um movimento em “avalanche” em condições de elevada umidade (Ma et al., 2019). Stroem et al. (2009) realizaram a secagem do bagaço de malte em um secador do tipo tambor rotativo utilizando vapor superaquecido, sendo observado o acúmulo de material sobre a superfície interna do tambor, especialmente próximo à alimentação de sólidos onde a umidade da biomassa seria maior (Stroem et al., 2009). Este comportamento estaria relacionado às interações superficiais da biomassa.

Comportamento térmico na secagem do bagaço

A Figura 4 apresenta a variação do adimensional de temperatura, θ , em função da umidade da biomassa. A operação pôde ser dividida em três regiões distintas: a Região 1, com a umidade adimensional superior a 0,6, que correspondia ao início da secagem; a Região 2, com a umidade entre 0,6 e 0,25 e a Região 3, com a umidade inferior a 0,25, que correspondia ao término da secagem.

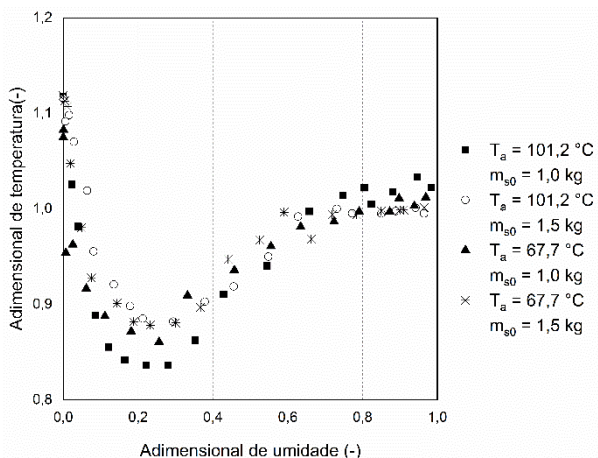


Figura 4: Adimensional de temperatura na secagem do bagaço de malte em função de sua umidade.

Na Região 1 pôde-se observar que o adimensional de temperatura, θ , apresentou valores próximos a 1, indicando que as temperaturas na superfície interna da drageadeira, T_w , e da biomassa, T_s ,

apresentaram valores próximos. Este seria um indicativo de que as fases se encontravam em equilíbrio térmico no início da operação. Na Região 2, foi observada a constante diminuição em θ , de aproximadamente 1,0 a 0,85, indicando que havia um crescimento mais intenso de T_w em comparação a T_s . Por fim, na Região 3, houve o constante aumento de θ , de aproximadamente 0,85 a 1,1, indicando que ao fim da operação a biomassa aquecia de forma mais acelerada em relação à superfície interna da drageadeira.

Estes dados indicaram que nas condições em que a biomassa apresentou uma maior umidade, justamente nas condições em que os fenômenos de adesão e coesão se mostraram predominantes na movimentação das partículas, havia uma intensa transferência de calor no contato estabelecido entre a biomassa e a superfície interna do secador. A partir da umidade inferior a 0,6, a aquecimento das fases ocorria sem uma transferência de calor significativa entre si. Estes resultados seriam um indicativo de que os fenômenos de adesão e coesão influenciariam não somente o movimento das partículas, mas também o comportamento térmico durante a operação de secagem.

Forças de adesão e a umidade do bagaço

A Figura 5 apresenta a variação da força de adesão entre uma superfície de cobre e o bagaço de malte em função de sua umidade. Pôde-se observar que a diminuição da umidade de 1,0 para 0,25 provocou a diminuição nas forças de adesão por área superficial de 1,4 para 0,14 N/cm². Com a umidade inferior a 0,25 as forças de adesão foram inexpressivas e com umidade inferior a 0,05 foram consideradas nulas, uma vez que não fora observada a aderência de partículas à superfície de cobre.

Em condições de elevada umidade, existe a predominância das forças capilares sobre as demais componentes da interação superficial e, devido à intensidade da capilaridade, a remoção de água seria responsável pela diminuição da força de adesão (Hamawand et al., 2015). O contato entre adesivo e aderente na presença de água se dá pela formação de ponte líquidas entre as superfícies dos materiais, sendo as moléculas de água provenientes de diferentes fontes, como a condensação de vapor ou a

difusão de água presente no interior das partículas (Li et al., 2014). Outros trabalhos identificaram a influência da umidade sobre outros fenômenos relacionados à interação superficial, como as tensões de cisalhamento e de tração, forças de compressão e ângulo de contato (Deng et al., 2020; Kobayashi et al., 2021).

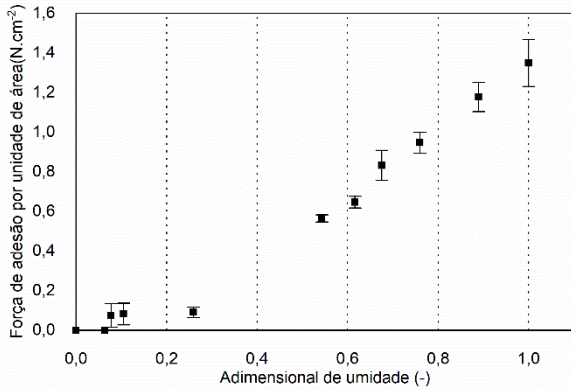


Figura 5: Forças de adesão entre o bagaço de malte e superfície de cobre em função da umidade.

CONCLUSÕES

As interações superficiais das partículas do bagaço de malte, a adesão com as paredes dos equipamentos e a coesão entre as partículas do próprio bagaço, apresentaram uma influência significativa sobre sua movimentação em um equipamento rotativo. Em condições de elevada umidade, foi observada a formação de um aglomerado coeso que apresentou baixa mobilidade, enquanto ao término da secagem, em condições de baixa umidade, as partículas de bagaço se movimentavam livremente com interação fraca com seus arredores. Estes seriam fortes indícios de que o processamento de materiais pegajosos, como o bagaço de malte utilizado no presente trabalho, requer uma maior atenção quanto a sua homogeneidade, sendo necessária a adoção de estratégias que minimizem os efeitos negativos das forças superficiais.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil

(CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001.

NOMENCLATURA

F_{ad}	Força de adesão	N
F_{cent}	Força centrífuga	N
m_{des}	Massa desprendida	kg
w	Velocidade angular	rad/s
r	Raio do suporte	m
Ω_s	Taxa de movimentação das partículas	rpm
T_a	Temperatura do ar	°C
T_w	Temperatura da parede	°C
T_s	Temperatura da biomassa	°C
X_{bu}	Umidade em base úmida	kg/kg
$X_{bu,eq}$	Umidade no equilíbrio dinâmico	kg/kg
$X_{bu,i}$	Umidade inicial	kg/kg
MR	Adimensional de umidade	-
θ	Adimensional de temperatura	-
m_{s0}	Massa inicial do bagaço	kg

REFERÊNCIAS

- Bhandari, B., & Howes, T. (2005). Relating the stickiness property of foods undergoing drying and dried products to their surface energetics. *Drying Technology*, 23(4), 781–797. <https://doi.org/10.1081/DRT-200054194>
- Deng, W., Xiao, J., Lai, Z., & Su, Y. (2020). A new method to characterize sludge stickiness during drying: Effects of sludge temperature and calcium oxide (CaO) on stickiness. *Drying Technology*, 38(9), 1107–1120. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1615938>
- Feiler, A. A., Stiernstedt, J., Theander, K., Jenkins, P., & Rutland, M. W. (2007). Effect of capillary condensation on friction force and adhesion. *Langmuir*, 23(2), 517–522. <https://doi.org/10.1021/la060456f>
- Hamawand, I., Da Silva, W. P., Eberhard, F., & Antille, D. L. (2015). Issues related to waste sewage sludge drying under superheated steam. *Polish Journal of Chemical Technology*, 17(4), 5–14. <https://doi.org/10.1515/pjct-2015-0062>
- Jaiser, S., Sanchez Salach, N., Baunach, M.,

- Scharfer, P., & Schabel, W. (2017). Impact of drying conditions and wet film properties on adhesion and film solidification of lithium-ion battery anodes. *Drying Technology*, 35(15), 1807–1817. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1276584>
- Kobayashi, N., Okada, K., Tachibana, Y., Kamiya, K., Zhang, B., Suami, A., Nakagawa, T., & Itaya, Y. (2021). Drying enhancement of sludge with resin-type drying accelerator and its mechanism. *Drying Technology*, 39(6), 834–845. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1725770>
- Kudra, T. (2003). Sticky region in drying - Definition and identification. *Drying Technology*, 21(8), 1457–1469. <https://doi.org/10.1081/DRT-120024678>
- Leobet, E. L., Perin, E. C., Fontanini, J. I. C., Prado, N. V., Oro, S. R., Burgardt, V. C. F., Alfaro, A. T., & Machado-Lunkes, A. (2020). Effect of the drying process on the volatile compounds and sensory quality of agglomerated instant coffee. *Drying Technology*, 38(11), 1421–1432. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1644347>
- Li, B., Wang, F., Chi, Y., & Yan, J. H. (2014). Adhesion and Cohesion Characteristics of Sewage Sludge During Drying. *Drying Technology*, 32(13), 1598–1607. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.910522>
- Ma, Y., Evans, T. M., Philips, N., & Cunningham, N. (2019). Modeling the effect of moisture on the flowability of a granular material. *Meccanica*, 54(4–5), 667–681. <https://doi.org/10.1007/s11012-018-0901-8>
- Morris, J. D., Daood, S. S., Chilton, S., & Nimmo, W. (2018). Mechanisms and mitigation of agglomeration during fluidized bed combustion of biomass: A review. *Fuel*, 230(February), 452–473. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.098>
- Mussatto, S. I., Dragone, G., & Roberto, I. C. (2006). Brewers' spent grain: Generation, characteristics and potential applications. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>
- Nguyen, T. T., Rambanapasi, C., de Boer, A. H., Frijlink, H. W., Ven, P. M. V. D., de Vries, J., Busscher, H. J., & Maarschalk, K. v. D. V. (2010). A centrifuge method to measure particle cohesion forces to substrate surfaces: The use of a force distribution concept for data interpretation. *International Journal of Pharmaceutics*, 393(1–2), 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.04.016>
- Ravindran, R., Jaiswal, S., Abu-Ghannam, N., & Jaiswal, A. K. (2018). A comparative analysis of pretreatment strategies on the properties and hydrolysis of brewers' spent grain. *Bioresource Technology*, 248, 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.039>
- Shih, Y. T., Wang, W., Hasenbeck, A., Stone, D., & Zhao, Y. (2020). Investigation of physicochemical, nutritional, and sensory qualities of muffins incorporated with dried brewer's spent grain flours as a source of dietary fiber and protein. *Journal of Food Science*, 85(11), 3943–3953. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15483>
- Stroem, L. K., Desai, D. K., & Hoadley, A. F. A. (2009). Superheated steam drying of Brewer's spent grain in a rotary drum. *Advanced Powder Technology*, 20(3), 240–244. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2009.03.009>
- Thundat, T., Zheng, X. Y., Chen, G. Y., Sharp, S. L., Warmack, R. J., & Schowalter, L. J. (1993). Characterization of atomic force microscope tips by adhesion force measurements. *Applied Physics Letters*, 63(15), 2150–2152. <https://doi.org/10.1063/1.110569>
- Trujillo, J. G., Teixeira, M. A. S., Lima, A. H. A., Montão, D. P., Ross, T. B., Riet-Correa, G., Cerqueira, V. D., & Bezerra Júnior, P. S. (2018). Ethanol poisoning in cattle fed with malted barley waste with brewer's yeast. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, 38(3), 382–386. <https://doi.org/10.1590/1678-5150-PVB-5308>